

Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto

Possibilidades de desenho e  
construção digital em tijolo a partir  
da obra de Raúl Hestnes Ferreira

Rui Miguel dos Santos Oliveira

Dissertação de Mestrado em Arquitectura

Orientador  
Professor José Pedro Sousa

Porto, 2015





## **Agradecimentos**

Queria agradecer ao Prof. José Pedro Sousa, a todos os elementos do DFL e ao Arq. Raúl Hestnes Ferreira pela disponibilidade e apoio na realização deste trabalho. Queria também agradecer a todos os meus amigos; a todos os que partilharam comigo este percurso académico; à Rita, ao Daniel, ao Paulo, à Joana, à Vera e em especial à Ana. Acima de tudo quero agradecer aos meus pais e ao meu irmão por todo o esforço, dedicação e sacrifício para tornar a realização deste curso possível.

NOTA: O tema desta dissertação foi desenvolvido no âmbito do Projecto de Investigação com a referência PTDC/ATP-AQI/5124/2012, financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia. No âmbito deste projecto, este trabalho sobre o tijolo contou com o apoio do parceiro industrial Cerâmica Vale da Gândara.



# Resumo

O tijolo tem acompanhado a construção desde os primórdios da sua existência – pode-se considerar o material mais básico na construção. O seu fabrico evoluiu acompanhando as grandes revoluções tecnológicas; no entanto, o seu assentamento manual manteve-se. Nas últimas décadas tem-se vindo a investigar e desenvolver processos de assemblagem de tijolo automatizados recorrendo à robótica.

A presente dissertação procura investigar como essas tecnologias podem interferir no desenho e na construção em tijolo e foca a compreensão do potencial das tecnologias de fabricação em termos estruturais e formais, na construção em tijolo. Para tal, recorre-se à obra do Arquitecto português Raúl Hestnes Ferreira com este material. Com o objectivo de perceber o potencial construtivo dos elementos pontuais na obra de Hestnes Ferreira, é feita uma análise mais específica, recorrendo a desenhos de pormenores dos elementos mais relevantes para o estudo bem como o testemunho do próprio Hestnes Ferreira. Para complementar o estudo, são apresentadas experimentações que evidenciam o encontro da arquitectura em tijolo dos casos de estudo, com as tecnologias de fabricação robótica e digital. Através da identificação de situações construtivas específicas – cunhal pilar e abóbada – procurou-se perceber como as tecnologias de digitais podem influenciar no desenho dessas situações. Esta investigação pretende dar a conhecer o potencial destas tecnologias, mesmo quando se usa um material *standard*. Não pretende condenar a construção manual mas demonstrar a possibilidade de construir além de alguns limites inerentes à construção tradicional; expondo uma perspectiva actual dos casos de estudo e expondo alternativas de construção desses mesmos pormenores.

**Palavras-chave:** Fabricação robótica e digital; Parametrização; Arquitectura em tijolo; Raúl Hestnes Ferreira



# Abstract

The brick has been present in construction since the beginning – it may be considered one of the most basic material in construction. Its fabrication has evolved alongside the big technological revolutions; however its manual way of laying persists. Over the last decades the laying methods resorting to robotics have been subject of research and development.

The present dissertation aims to study how these technologies can interfere in the design and brick construction and tries to comprehend the potential of these technologies in structural and formal ways in brickwork. To accomplish this purpose, the brickwork of Arch. Raúl Hestnes Ferreira is analysed because of its expressiveness in constructive details.

To understand the potential of these elements, the present work analyses plans and details of the most significant elements of Hestnes Ferreira's work and has the contribute of the architect himself. In addition, this study presents experimentations that point out where brick architecture meets robotic and digital fabrication technologies. This research aims to clarify the potential of these technologies even with an ordinary material. The work does not intend to condemn manual construction; instead, it demonstrates the possibilities of building beyond some of its limitations.

**Keywords:** Robotic and digital fabrication; Parametrization; Brickwork architecture; Raúl Hestnes Ferreira



A presente dissertação foi escrita conforme o antigo acordo ortográfico da língua portuguesa.

# Índice

## **Capítulo 1 \_ Introdução | 1**

- 1.1 \_ Motivação | 1
- 1.2 \_ Tema | 2
- 1.3 \_ Objectivos | 2
- 1.4 \_ Metodologia | 3
- 1.5 \_ Estrutura | 4
- 1.6 \_ Contribuições | 5

## **Capítulo 2 \_ Arquitectura em tijolo | 7**

- 2.1 \_ Raúl Hestnes Ferreira | 7
  - 2.1.1 \_ Influências e pensamento arquitectónico | 7
  - 2.1.2 \_ Obra em tijolo | 14
- 2.2 \_ O tijolo na arquitectura contemporânea | 22

## **Capítulo 3 \_ Tecnologias robóticas aplicadas ao tijolo | 29**

- 3.1 \_ Fabricação robótica na arquitectura em tijolo | 29
  - 2.3.1 \_ Introdução à tecnologia robótica | 29
  - 2.3.2 \_ Exemplos de aplicação | 33

## **Capítulo 4 \_ Investigação prática sobre desenho e construção digital em tijolo | 51**

- 4.1 \_ Problemática | 51
- 4.2 \_ Abordagem e processos | 52



4.3 \_ Exploração digital de construções em tijolo | 57

4.3.1 \_ Cunhal | Biblioteca Municipal da Moita | 57

4.3.2 \_ Pilar | Biblioteca Municipal da Moita | 63

4.3.3 \_ Abóbada | Casa da Cultura de Beja | 69

4.4 \_ Produção automatizada de uma estrutura em tijolo | 76

4.4.1 \_ Introdução | 76

4.4.2 \_ Computação e prototipagem | 77

4.4.3 \_ Fabricação | 81

## **Capítulo 5 \_ Conclusão | 89**

5.1 \_ Reflexões finais | 89

## **Lista de acrónimos | 95**

## **Lista de *softwares* | 97**

## **Lista de comandos | 99**

## **Bibliografia | 101**

## **Créditos de imagens | 109**

## **Anexos | 121**

A \_ Exemplos de assentamentos de tijolo

B \_ Conversas com Raúl Hestnes Ferreira

C \_ Desenhos das obras de Raúl Hestnes Ferreira

D \_ Definições de Grasshopper

E \_ Especificações das impressões 3D



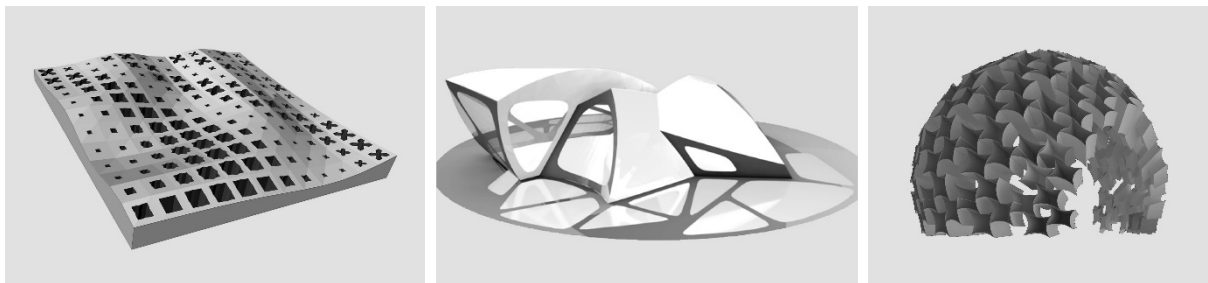
Nota: devido ao elevado número de referências bibliográficas em inglês, todas as traduções de inglês para português foram realizadas pelo autor.



# Capítulo 1 \_ Introdução

## 1.1 \_ Motivação

O meu interesse pessoal pelas tecnologias digitais na arquitectura resulta da minha participação na unidade curricular Geometria Construtiva na FAUP. [Fig. 1] Ao longo do meu percurso académico desenvolvi um especial interesse em novas formas, texturas e conceitos -- interesse este que se tornou mais intensivo à medida que explorava cada vez mais regularmente o uso do computador e das suas potencialidades. A escolha do tijolo cerâmico como material de estudo para uma investigação sobre tecnologia, deve-se ao facto deste ser um material barato e tradicionalmente muito usado na arquitectura portuguesa. Para além disso, é um material *standardizado* que possui um grande potencial plástico.



As técnicas e tecnologias de fabricação digital se tratam de ferramentas emergentes com uma crescente importância na arquitectura contemporânea, uma vez que permitem ultrapassar problemas e limitações existentes no desenho e fabrico mais tradicional. É pertinente referir que me interessa o confronto entre o que se construiu de forma tradicional e o modo como poderia ter sido contruído se na época houvesse acesso às tecnologias de desenho e fabricação existentes actualmente.

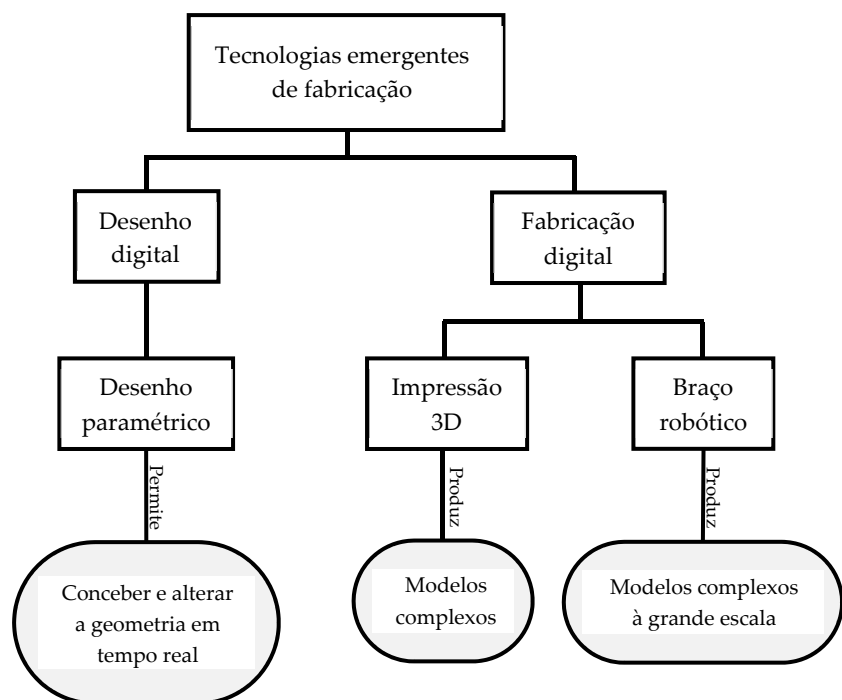
▲ Fig. 1 \_ trabalhos realizados pelo autor no âmbito das disciplinas *Geometria e Arquitectura* e *Geometria Construtiva*.

## 1.2 \_ Tema

Na presente dissertação são abordadas duas matérias da arquitectura que se intersectam:

- Desenho e construção em tijolo
- Tecnologia digital

O tema da dissertação é transversal as estas duas matérias e aborda o impacte das tecnologias de fabricação digital e robótica na arquitectura, especificamente na arquitectura em tijolo.



► Fig. 2 \_ diagrama da relação dos pontos abordados nesta dissertação.

## 1.3 \_ Objectivos

Os objectivos desta dissertação dividem-se em três pontos:

- 1) Estudo teórico e prático das tecnologias digitais de desenho e construção emergentes e estudo de técnicas de montagem de tijolo cerâmico na arquitectura contemporânea;

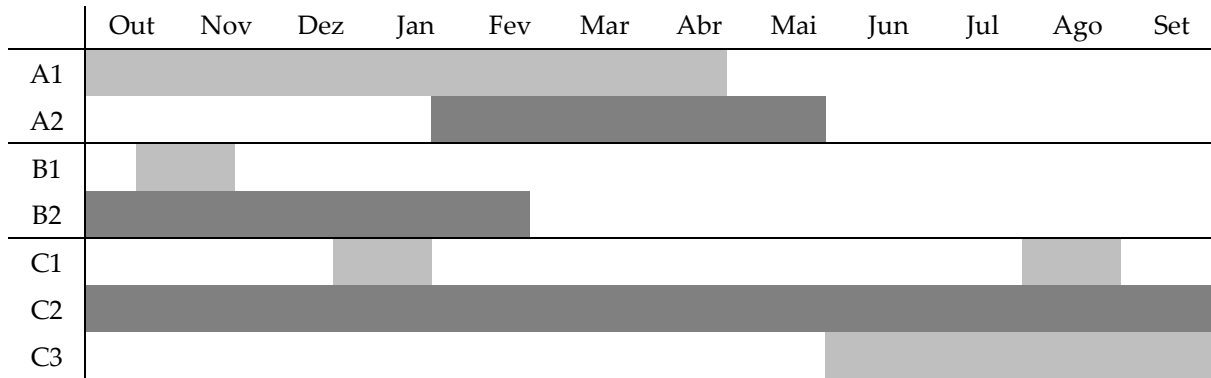
- 2) Análise da obra de Raúl Hestnes Ferreira como principal caso de estudo, recorrendo às tecnologias de fabricação digital, ultrapassando as limitações enfrentadas na altura da construção da obra;
- 3) Análise crítica ao impacto das tecnologias digitais e robóticas na construção em tijolo, estudando possibilidades formais, estruturais e plásticas através de várias obras de referência.

## **1.4 \_ Metodologia**

O desenvolvimento da dissertação tem em conta uma estrutura na qual existe tanto uma componente teórica com uma prática. O desenvolvimento dessas duas componentes resultou da execução das seguintes tarefas:

- A1. Consulta bibliográfica seleccionada, focada nas tecnologias digitais e de fabricação robótica e na construção em tijolo.
- A2. Levantamento de casos práticos de construção em tijolo usando tecnologias de fabricação robótica, relevantes ao estudo.
- A3. Visita à fábrica da Cerâmica Vale da Gândara.
- B1. A Obra de Raúl Hestnes Ferreira como principal caso de estudo.
- B2. Contacto com Raúl Hestnes Ferreira a fim de obter informações e detalhes acerca da obra, bem como para discutir a temática da dissertação.
- C1. Colaboração prática na actividade de investigação do DFL – Digital Fabrication Lab.

C2. Projecto prático, incluindo criação de modelos tridimensionais e a sua impressão à escala reduzida, bem como a criação de protótipos à escala real.



▲ Fig. 3 \_ diagrama da calendarização o dos pontos abordados nesta dissertação.

## 1.5 \_ Estrutura

Esta tese está organizada em cinco capítulos incluindo o presente (Introdução). O primeiro capítulo apresenta-se como uma introdução à dissertação. O segundo expõe as obras relevantes ao estudo pretendido nesta dissertação e expõe o estado da arte das tecnologias de fabricação robótica com tijolo. No terceiro capítulo são expostos métodos de fabricação robótico e exemplos da sua aplicação. No quarto capítulo é apresentada uma análise mais detalhada dos casos de estudo, assim como casos práticos. No quinto e último capítulo é exposta uma conclusão ao tema da presente dissertação.

### Capítulo 1 \_ Introdução

Apresenta as motivações que levaram ao desenvolvimento desta dissertação e à identificação da sua problemática. Apresenta a metodologia utilizada para a sua pesquisa, define a sua organização e as contribuições do trabalho.

### Capítulo 2 \_ Arquitectura em tijolo

Este capítulo começa por uma breve introdução à arquitectura de Raúl Hestnes Ferreira, apresentando depois a sua obra em



tijolo de uma forma mais detalhada comparando-a a obras contemporâneas. Contextualiza e faz uma revisão do actual uso das tecnologias de fabricação digital e robótica aplicadas ao tijolo investigando e apresentando, também, obras em tijolo usando essas tecnologias. Desta forma propõe-se uma perspectiva da arquitectura no que toca à construção em tijolo e através das tecnologias de fabricação digital e robótica.

#### Capítulo 4 \_ Investigação pratica sobre desenho e construção digital em tijolo

Apresentação dos casos de estudo de forma mais detalhada, recorrendo a documentação fornecida pelo arquitecto. Reflectindo o cuidado em apoiar a visão teórica com experiência prática, este capítulo apresenta experimentações realizadas pelo autor sustentadas pelos conhecimentos adquiridos no capítulo anterior. Deste modo, descreve-se a aprendizagem e prática do processo e as vantagens e desvantagens do uso das tecnologias digitais na construção em tijolo.

#### Capítulo 5 \_ Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as vantagens e desvantagens do uso das tecnologias emergentes na construção em tijolo.

## **1.6 \_ Contribuições**

O presente trabalho pretende contribuir essencialmente para:

- Compreender potencialidades formais e expressivas do desenho digital e da construção robótica aplicados ao tijolo;
- Esclarecer a obra em tijolo, pouco documentada, de Raúl Hestnes Ferreira;
- Ser um meio de transmissão de conhecimento através das experiencias realizadas.



## Capítulo 2 \_ Arquitectura em tijolo

### 2.1 \_ Raúl Hestnes Ferreira

#### 2.1.1 \_ Influências e pensamento arquitectónico

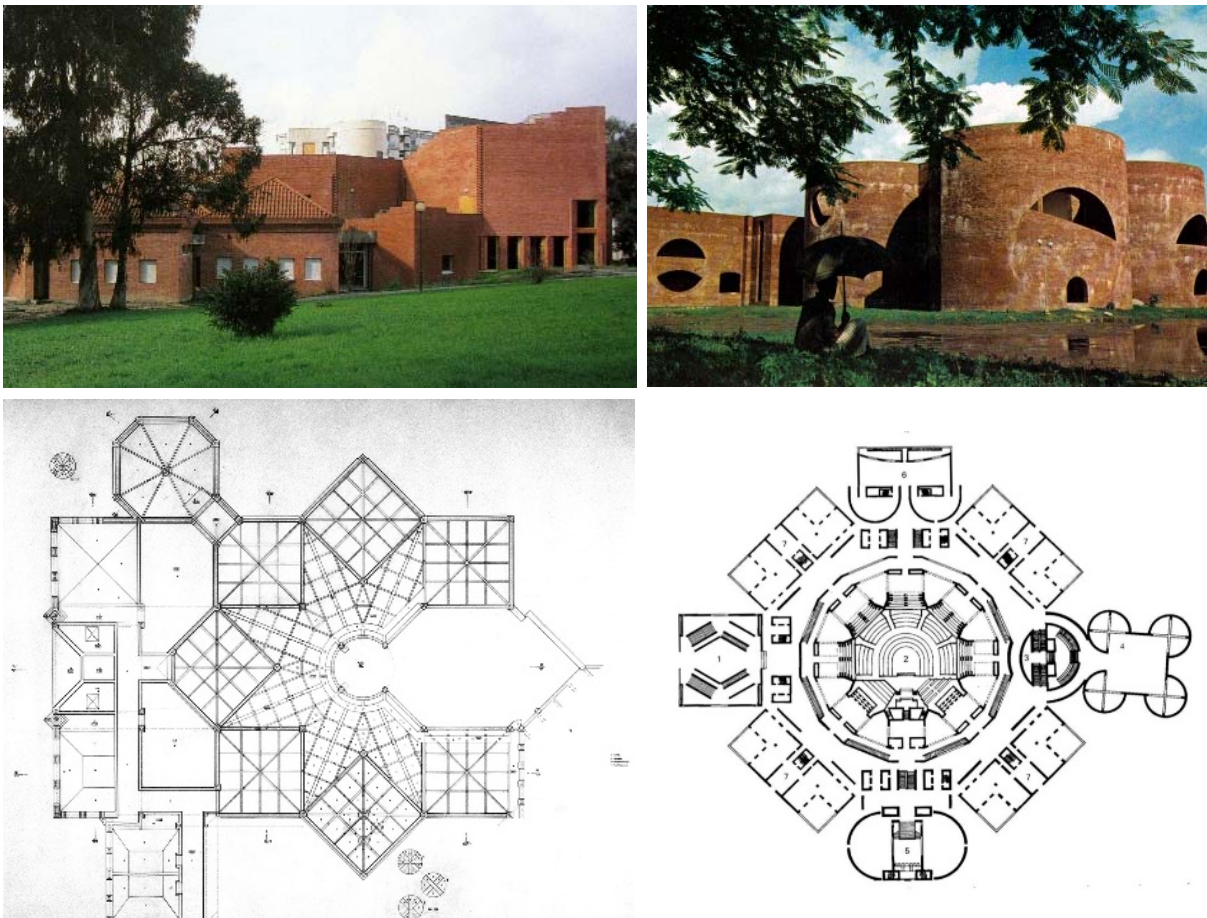
Raúl Hestnes Ferreira [Fig. 4] é um daqueles arquitectos em que a obra e a personalidade do seu autor são inseparáveis. (Neves, 2002: 11) Com um estilo arquitectónico muito próprio e despegado de modas, sempre se distinguiu pelo seu tratamento diferenciado aos pormenores. Hestnes Ferreira desempenha um papel fundamental no panorama da arquitectura portuguesa contemporânea. (Neves, 2002: 5) Sofreu influências da arquitectura de Louis Kahn depois duma passagem pelos Estados Unidos da América; no entanto não fica preso à arquitectura deste último e continua o seu percurso em busca de um estilo arquitectónico rico e marcadamente pessoal. Kahn projecta edifícios de escala monumental, desligados da envolvente e assume-os como objectos isolados. Ao contrário do arquitecto americano, Hestnes Ferreira segue valores europeus e a sua arquitectura apresenta outras preocupações culturais. Apesar dessas influências europeias, nomeadamente de Alvar Aalto, estas não tiveram o impacto transformador em Hestnes Ferreira que Louis Khan teve. (Tavares, 2003: 89)

Louis Khan era, como Hestnes Ferreira se veio a tornar, um arquitecto marginal, fortemente marcado pela formação segundo os cânones da arquitectura das belas-artes e de métodos de composição elementar. Baseado-se na simetria, axialidade, proporção, clareza formal, e nos valores históricos propondo uma alternativa arquitectónica ao Movimento Moderno. A experiência de Hestnes Ferreira com Kahn foi de encontro com



▲ Fig. 4 \_ arquitecto Raúl Hestnes Ferreira no seu escritório.

algumas preocupações pessoais do primeiro tais como a vocação da arquitectura para marcar o local, os materiais e a sua utilização ou a própria noção de arquitectura. (Tavares, 2003: 91-92) Hestnes Ferreira afirma ter encontrado na arquitectura de Kahn os mesmos “valores da integridade estrutural e construtiva” presentes na arquitectura de Alvar Aalto, tendo também impacto em si o interesse de Kahn pela construção ancestral, em particular a romana. (Figueira, 2010: 82)



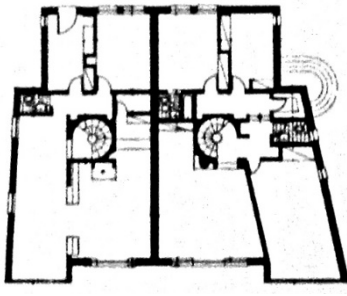
▲ Fig. 5 \_ comparação entre a biblioteca Municipal da Moita (à esquerda) e o Instituto nacional em Dacca de Louis Kahn (à direita) em termos de volumetria (em cima) e planta (em baixo).

Segundo Neves (2002: 7) “Os temas da arquitectura de Hestnes Ferreira resultam da domesticação, da individualização, da composição kahniana e dos interiores aaltianos, realizados através de uma tensão constante entre a ordem e a catástrofe”. As influências de Aalto e Kahn podem-se apresentar como opostas e incompatíveis, no entanto, é possível encontrar na obra de Hestnes Ferreira marcas de ambos os arquitectos: simetrias tendencialmente monumentalizantes contrapõem-se à desfragmentação das

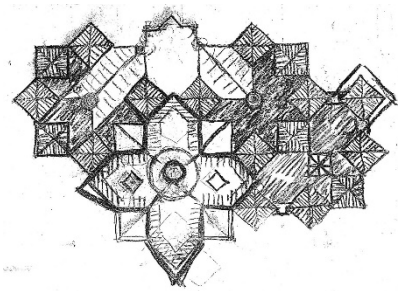
margens dos grandes eixos [Fig. 5]; a utilização de formas geométricas puras e tranquilas quebradas por formas “agitadas” como *“hexágonos irregulares, losangos e obsessivos ângulos agudos, agressivamente agudos, que testemunham a brusquidão quase incontrolada dos gestos do lápis sobre o papel”* (Neves, 2002: 7); ritmos de vãos, estrutura e estereotomia do tijolo caracterizados por um *“stacatto nervoso muito característico das arquitecturas modernas italianas de há 50 anos e pela vontade, dessas e outras arquitecturas – e de Hestnes Ferreira – de aproximar a escala do utente.”* (Neves, 2002: 8). Além dessas influências, Hestnes Ferreira procura trabalhar as formas utilizando métodos e instrumentos que estabelecem a sua forma de conceber arquitectura. Isso é perceptível na sua obra, pois cada uma é como que um acontecimento novo e claramente distinto dos demais, não sendo de forma imediata ou linear que se encontram semelhanças formais ou de linguagem com as obras precedentes. A cada novo projecto a pesquisa recomeça, e cabe aos instrumentos usados, às formas de trabalhar e de pensar definir a metodologia de trabalho que serve de base à sua produção arquitectónica. (Tavares, 2003: 92)

Manuel Albuquerque Tavares (2003: 93-100) sistematiza as formas de projectar de Hestnes Ferreira nos oito pontos apresentados em baixo:

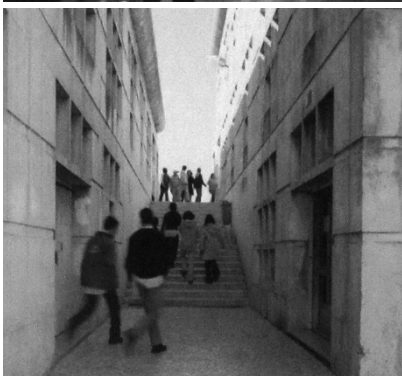
- A forma de usar a geometria
- O edifício e o contexto
- A Escala
- A construção e os materiais
- A dimensão histórica
- O trabalho sobre elementos pontuais
- O desenho e a maquete
- A forma



▲ Fig. 6 \_ planta da casa de Queijas.



▲ Fig. 7 \_ esquisso de Hestnes Ferreira da planta da Biblioteca Municipal da Moita.



▲ Fig. 8 \_ interior e exterior da escola secundária de Benfca.

A geometria é o principal instrumento na concepção dos projectos de Hestnes Ferreira. A composição das plantas parte da articulação de formas geométricas simples criando desenhos complexos em alguns casos. Na casa de Queijas (1968) a planta [Fig. 6] parte duma simetria d reflexão de uma geometria simples, havendo uma torção que a quebra. Um exemplo oposto é o caso da Biblioteca Municipal da Moita, [Fig. 7] em que a sua planta é a justaposição e diálogo de vários elementos geométricos que formam, no todo, uma forma bastante complexa, que faz lembrar as obras de Louis Kahn. (Tavares, 2003: 94)

Na sua arquitectura, Hestnes Ferreira não procura nas pré-existências pistas para as resoluções formais das suas obras, portanto a integração da obra na envolvente não é imediata, surgindo, aparentemente, como um objecto isolado. No entanto, Manuel Albuquerque Tavares (2003: 95) não considera esse isolamento absoluto. Apesar do seu universo fortemente pessoal, existe em Hestnes Ferreira uma preocupação com o lugar tendo em conta as características do terreno ou do edificado pré-existente. *“Por vezes o diálogo com a envolvente é feito por contraste ou oposição, contrapondo-se o novo edificio a um envolvente descaracterizada”* – é exemplo disso a casa de Queijas e a escola secundária em Benfca. (Tavares, 2003: 95) Independentemente das características do terreno, as obras de Hestnes Ferreira surgem sempre com a preocupação da humanização da escala dos edifícios. Essa influência provém da sua passagem académica pela Escola do Porto e do contacto com a obra de Alvar Aalto. (Tavares, 2003: 95) A sua experiência com Louis Kahn também contribuiu para a sua preocupação com a escala. Mais uma vez é exemplo disso a escola secundária de Benfca, onde há uma preocupação de manter a escala humana no interior mesmo que o exterior tenha uma escala mais monumental. [Fig. 8] (Saraiva, 2012: 193)

Nas suas obras, a escolha do material é normalmente feita após a definição da forma do edifício. Essa escolha é determinada pelas técnicas construtivas tradicionais locais, ou então por questões funcionais ou de facilidade de execução, como em Benfica ou no ISCTE. *“Os materiais são trabalhados em função das suas limitações construtivas e Hestnes Ferreira tira partido das suas potencialidades formais e expressivas”*. (Tavares, 2003: 96) Na casa de Queijas, na Caixa Geral de Depósitos de Avis e na Biblioteca Municipal da Moita é recuperada a construção tradicional em tijolo maciço, enquanto que na Casa da Cultura de Beja se recorre ao saber tradicional da construção de abóbadas. [Fig. 9]



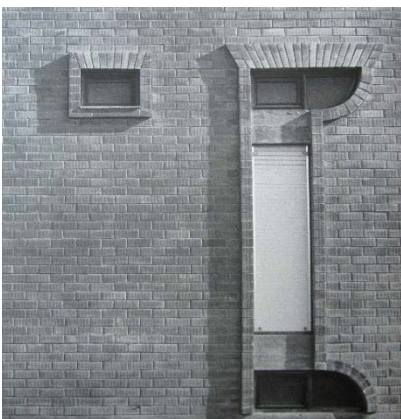
◀ Fig. 9 \_ da esquerda para a direita o ISCTE, Caixa Geral de Depósitos da Avis, abóbada da Casa da Cultura de Beja.

Em todo o seu processo criativo, a influência da história está presente e Hestnes Ferreira faz dela fonte de inspiração para a sua arquitectura. Os seus edifícios invocam a memória e a história do lugar. As fontes históricas a que recorre habitualmente são a tradição de edificação portuguesa e a história da arquitectura. Essas referências são trabalhadas de forma a serem integradas num objecto arquitectónico marcadamente pessoal. Portanto, para Hestnes Ferreira, a história e a tradição não são encaradas *“como um receituário, mas como algo a ter em consideração e a reinventar.”* (Tavares, 2003: 96-97)



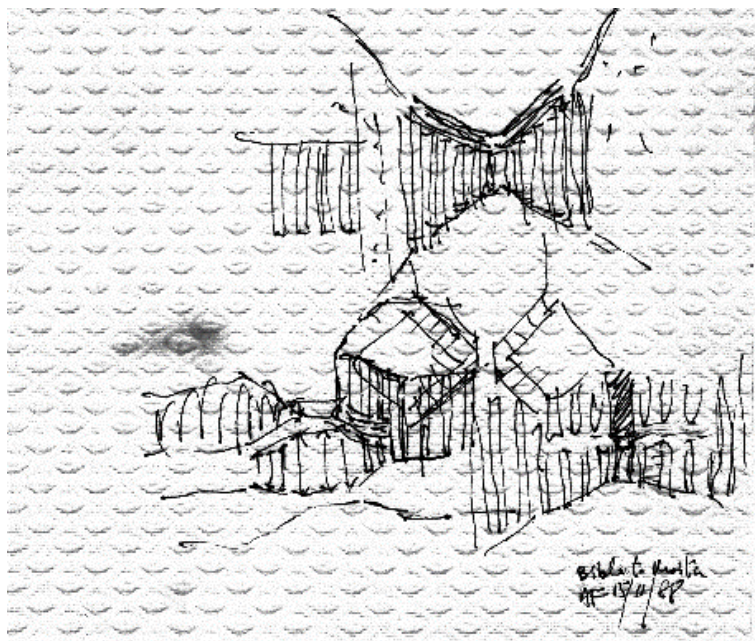
Em todo o seu trabalho há uma constante preocupação pelo desenho dos detalhes. Esse trabalho é executado “sobre elementos secundários, pontuais da construção, que são concebidos quase como objectos escultóricos com uma grande expressividade” enriquecendo o espaço. (Tavares, 2003: 97) Hestnes Ferreira encara as “limitações” do material como princípio gerador dos pormenores. Por exemplo, as combinações dos tijolos depende da dimensão *standard* (7x10.5x22cm), e dessa dimensão variam as altimetrias e planimetrias dos desenhos. Todos os edifícios contruídos por Hestnes Ferreira se baseiam nas possibilidades quase ilimitadas de combinações de tijolos, tendo o cuidado para que essa diversidade fosse coerente com o conceito pretendido nas obras projectadas. (P. B. L. H. Sousa, 2002: 122) Hestnes Ferreira desenhou sempre janelas fugindo do clássico e banal, empregando uma plasticidade e expressão modernas. Raramente foram projectadas empenas e cérceas tradicionais. Os seus desenhos eram invenções da tradição que a arquitectura nos anos 80 e 90 desistira de ter em conta. (Neves, 2002: 5)

Embora esse tipo de tratamento exista em praticamente toda a obra de Hestnes Ferreira, serão aqui apresentados os casos da casa de Queijas e da Biblioteca Municipal da Moita. No primeiro exemplo, as janelas foram trabalhadas de forma a não serem a clássica janela rectangular ou quadrada, mas sim de forma a constituírem um elemento de destaque na fachada. [Fig. 10] No caso da biblioteca, é de destacar a resolução dos cunhais das paredes exteriores, as paredes do auditório e os pilares da sala de leitura como veremos mais à frente. Em todos os casos, nota-se um exímio trabalho do tijolo explorando, assim a plasticidade de um material *standardizado* que à partida se pode considerar formalmente limitativo. Na arquitectura de Hestnes Ferreira há um visível gosto em trabalhar estes detalhes, partindo à descoberta das possibilidades formais e expressivas que os materiais lhe proporcionam e construindo desse modo um conjunto de elementos fortemente caracterizadores.



▲ Fig. 10 \_ pormenor de uma janela da casa de Queijas.





◀ Fig. 11 \_ esboço de Hestnes Ferreira do interior da Biblioteca da Moita.

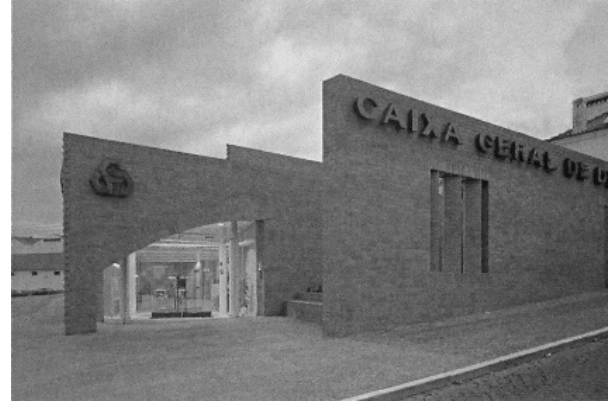
Hestnes Ferreira usa o desenho como uma forma de procurar a forma, pouco definitiva e ainda dissolvida nas ideias iniciais dum projecto. [Fig. 11] *“O desenho não é encarado como um instrumento de trabalho que conduz a resultados formais de forma accidental ou intuitiva”, mas sim “parte integrante dum processo racional e controlado que tem importância fundamental na forma final dos seus edifícios”.* (Tavares, 2003: 98) O trabalho em maquete permite visualizar o projecto a três dimensões. A partir desses modelos é possível ter uma percepção dos espaços e da luz que os define. (Tavares, 2003)

A forma dos seus edifícios não é a transcrição do programa interior, as ligações interior-exterior não são lineares, fazendo com que o exterior não revele o programa interior. O resultado formal final resulta de um processo de investigação intenso que faz com que, no fim, uma forma seja impossível de dissociar em partes sem quebrar a unidade da outra ou todo o conceito desta. Para Hestnes Ferreira a definição duma forma clara é mais importante que a integração mimética no contexto envolvente. Esta máxima caracteriza os seus edifícios assim como a preocupação em dar um carácter simbólico aos mesmos. (Tavares, 2003: 99)

Como foi referido, Hestnes Ferreira tem influências europeias e americanas. Desta forma compreende-se que a cada projecto a pesquisa recomeça, pois nos Estados Unidos não existe herança histórica e arquitectónica. Por outro lado, a sua influência europeia leva-o a interessar-se pela arquitectura histórica europeia. Esta mistura faz com que no trabalho de Hestnes Ferreira haja uma preocupação com as relações históricas mas ao mesmo tempo uma vontade de investigação e de pôr em causa as formas arquitectónicas. (Tavares, 2003: 98) A partir dessas influências, Hestnes Ferreira retira aquilo com que se identifica, segundo a sua própria maneira de projectar e pensar, construindo um modo muito próprio e pessoal de fazer arquitectura independente de correntes ou tendências arquitectónicas. (Tavares, 2003: 100)

### **2.1.2\_Obra em tijolo**

Tendo em conta a vasta obra de Hestnes Ferreira, pode-se dizer que as obras que usam como material base o tijolo são um caso isolado, o que não quer dizer que sejam desprovidas de qualidade arquitectónica, muito pelo contrário. Apenas por três vezes foi esse o material eleito para caracterizar obras do arquitecto de Lisboa, sendo elas a casa de Queijas, desenhada a partir de 1967 sendo concluída em 1973, a Agência da Caixa Geral de Depósitos de Avis, desenhada a partir de 1985 e concluída em 1991 e a Biblioteca Municipal Bento de Jesus Caraça na Moita, desenhada a partir de 1989 e concluída em 1997. (P. B. L. H. Sousa, 2002: 118) Recordo que, tendo em conta o tema desta dissertação, será aqui explorada, para além das obras referidas em cima, um obra que não usa o tijolo como material base mas faz um uso pertinente do mesmo: trata-se da Casa da Cultura de Beja (1985). [Fig. 12]



▲ Fig. 12 \_ obras de Hestnes Ferreira que fazem uso do tijolo da esquerda para a direita casa de Queijas, Caixa Geral de Depósitos de Avis, Casa da Cultura de Beja e Biblioteca Municipal da Moita.

### \_ Casa de Queijas (1973)

Esta casa foi a primeira obra de Hestnes Ferreira em tijolo. (P. B. L. H. Sousa, 2002: 121) Trata-se dum volume compacto junto a uma rua com trânsito intenso, adoptando uma posição de destaque no acesso ao aglomerado residencial. A decisão de construir a casa em tijolo partiu da vontade de dar mais



◀ Fig. 13 \_ pormenor da chaminé da casa de Queijas.

consistência e uma melhor manutenção. A sua concepção revelou-se bastante exigente, pois tentou-se não banalizar o material, recorrendo, para isso, ao saber dos velhos mestres da construção em tijolo. (Neves, 2002: 59)



▲ Fig. 14 \_ comparação de alçados entre a casa de Queijas (à esquerda) e a Escola de Gestão em Ahmadabad (à direita).

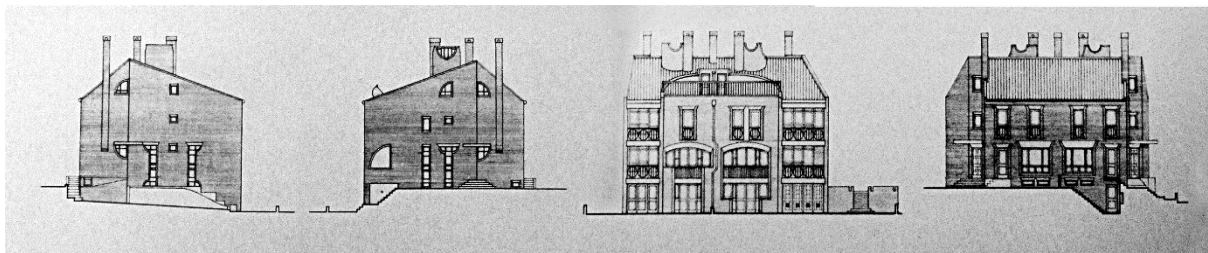
Segundo o próprio Hestnes Ferreira no Seminário sobre Paredes de Alvenaria (2002: 121) a sua experiência em Filadélfia com o arquitecto Louis Kahn, contribuiu para a execução da casa de Queijas. A pesquisa inicial sobre o material incluiu, para além de livros técnicos e manuais de construção, o estudo de obras do arquitecto americano como o Centro Governamental em Dacca ou a Escola de Gestão em Ahmadabad. [Fig. 14] A casa de Queijas é o reflexo dos ensinamentos de Kahn: a imagem tectónica do tijolo, o uso de arcos e a imagem claramente doméstica. Os vãos e a cobertura fazem referência à ideia ancestral de casa, os arcos abatidos remetem para a construção romana e as chaminés em tijolo para as tradições islâmicas. No entanto, não se trata de um regresso ao passado, mas sim uma invenção que assenta nos temas tradicionais das culturas mediterrânicas. (Figueira, 2010: 83-84)

*“Em primeiro lugar procurou-se conhecer as características do material bem como os cuidados a ter na sua execução incluindo a definição das respectivas especificações técnicas”, bem como “conhecimento das capacidades estruturais do material e os limites impostos para a sua execução (...) e, também, a mão-de-obra envolvida nesses trabalhos.”* (P. B. L. H. Sousa, 2002: 122) *“Nada é realmente verdadeiro, mesmo se parece ser. Se os elementos arquétipos remetem para a tradição, o desenho é novo” e “as técnicas construtivas artesanais são invadidas por uma liberdade formal e gráfica”* (Figueira, 2010: 84). À primeira vista o edificado parece duas casas comuns com o clássico telhado de duas águas, [Fig. 15] mas um olhar mais atento revela que cada elemento tem um cuidado desenho: as chaminés, [Fig. 16] as janelas, [Fig. 10] todos os elementos fazem parte de uma *“tradição reinventada”*. (Figueira, 2010: 84)



Na casa de Queijas “foi entendido desde o início que, independentemente da articulação interior do edifício, constituída por uma estrutura em betão armado completada por paredes de alvenaria de tijolo rebocado e pintado, o exterior seria inteiramente definido por superfícies de tijolo à vista formando uma espécie de casca coerente e unitária” (P. B. L. H. Sousa, 2002: 123)

▼ Fig. 15 \_ alçados da casa de Queijas da esquerda para a direita alçado norte, alçado sul, alçado poente, alçado nascente.



### \_Caixa Geral de Depósitos (CGD) de Avis (1991)

depois da casa de Queijas esta foi a segunda obra em tijolo de Hestnes Ferreira. Embora a primeira tenha sido bem sucessiva, este novo projecto partiu duma pesquisa conceptual e fundamentação novas, não se tornando numa mera reprodução da obra anterior. A escolha do material deveu-se à necessidade de realçar o exterior do edifício tendo em conta a diversidade da sua envolvente, que intramuros, se caracteriza por aglomerados de pequena escala, predominantemente brancos, com excepção para o Convento da ordem Militar de Avis. No exterior da muralha, o crescimento desarticulado levado a cabo ao longo dos tempos reflecte-se em edifícios de dimensões e aspectos distintos. O edifício da CGD fica à entrada da vila, num

▼ Fig. 16 \_ CGD de Avis da esquerda para a direita entrada, pormenor do cunhal.





▲ Fig. 17 \_ entradas de luz zenital na recepção da CGD de Avis.



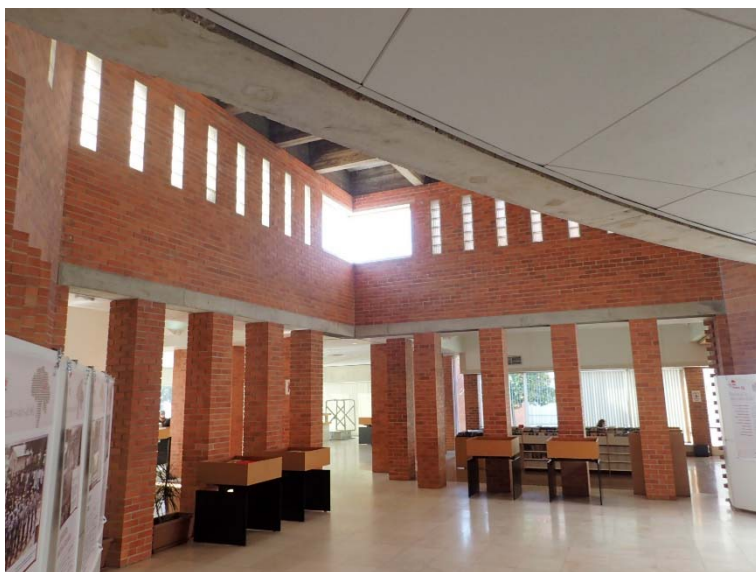
▲ Fig. 18 \_ alçado poente da CGD de Avis.

quarteirão muito visível, pelo que teria um importante papel de ligação entre o “caos” extramuros e a maior homogeneidade do edificado intramuros. (P. B. L. H. Sousa, 2002: 125-126) Após a definição do programa e da implantação, e tendo em conta a ligação da CGD com o aglomerado intramuros, decidiram que a imagem do edifício deveria ser sóbria, distinguindo-se pela abordagem conceptual, tectónica e arquitectónica.

À semelhança da casa de Queijas, no edifício da CGD, o tijolo não é autoportante, tendo uma estrutura de betão. Essa estrutura é visível pelo interior e caracteriza pormenores do edifício como as entradas de luz zenital [Fig. 17]. O tijolo é o elemento principal do revestimento das paredes exteriores, enfatizando a extensão de uma longa parede larnaja que assinala a entrada, e as entradas de luz triangulares ritmadas que acentuam o seu “peso”. [Fig. 18] A entrada é marcada por dois semi-arcos circulares constituídos por duas fiadas contínuas de tijolos, a cutelo, sobrepostas, que convergem num cunhal cujo pormenor é um “pente” em tijolo [Fig. 19], muito característico nas obras de Hestnes Ferreira. (P. B. L. H. Sousa, 2002: 127)

### \_ Biblioteca Municipal da Moita (1997)

O início do projecto da biblioteca começou alguns anos após o início do projecto da CGD mas ainda antes da sua conclusão. A biblioteca iria partilhar o mesmo espaço com o tribunal, havendo um contraste entre o edifício do tribunal, compacto revestido a pedra e o edifício da biblioteca, recortado e revestido a tijolo. No entanto devido a problemas no terreno, a biblioteca foi implantada noutro local, sofrendo algumas alterações por forma a adaptar-se ao novo terreno. Existe, mais uma vez, uma forte ligação entre o tijolo e o betão, estando este último associado aos grandes envidraçados da entrada. No caso do tijolo, este não é usado exclusivamente no exterior do edifício, mas é incorporado também paredes interiores das salas de

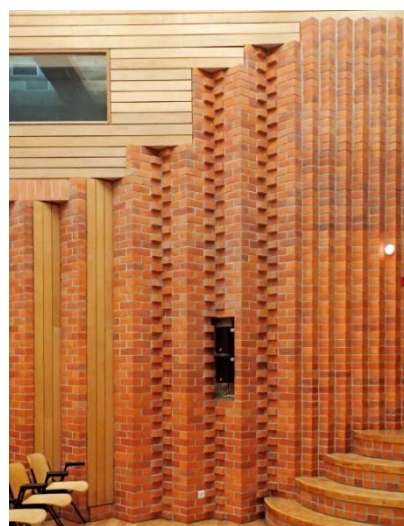


◀ Fig. 19 \_ sala de exposições da Biblioteca Municipal da Moita.

leitura, auditório, sala audiovisual, bem como no revestimento dos pilares (P. B. L. H. Sousa, 2002: 128-129) [Fig. 20] com um tratamento plástico ao qual Raúl Hestnes Ferreira nos habituou.

Assim, a entrada faz-se por um corpo que se destaca, em betão com grandes envidraçados. Chega-se depois ao centro do edifício marcado pelo cruzamento de dois sistemas de pilares que direccionam o fluxo quer lateralmente para a zona de leitura, quer em frente para a sala de exposições com pé direito duplo, rodeada por um pórtico em tijolo onde assentam paredes texturadas através do trabalho com o tijolo, com aberturas por onde é feita a iluminação deste espaço e uma laje em betão nervurada. (P. B. L. H. Sousa, 2002: 129) É através da sala de exposições que se tem acesso ao bar e ao auditório. No primeiro, Hestnes Ferreira teve o cuidado de o tratar como o fez com toda a obra, tornando-o num pormenor delicado ao contruir, com plasticidade, o balcão do bar em tijolo [Fig. 21], pousando apenas uma pedra no topo deste. No auditório, e como já referido, o exímio trabalho do tijolo nas paredes torna-o, para mim, o espaço mais admirável desta obra.

A biblioteca da Moita é uma obra em que a plasticidade do tijolo é estudada e levada a um nível muito pouco visto em obras em tijolo, muito menos quando se trata de um edifício dos anos 90.



▲ Fig. 20 \_ Biblioteca Municipal da Moita de cima para baixo sala de leitura, parede do auditório





▲ Fig. 21 \_ balcão do bar da biblioteca da Moita.

O desenho aprofundado do tijolo está presente em praticamente todo o edifício, designadamente nos pilares, cunhais, vãos e nas paredes. O uso do tijolo na biblioteca da Moita é inovador quando comparado com os seus projectos anteriores, pois este estende-se até aos espaços interiores e reveste espaços onde normalmente se usam materiais mais nobres como a madeira. No entanto, é aplicado de tal forma que dignifica esses espaços, tornando-os ainda mais característicos.

### \_ Casa da Cultura de Beja

Embora não se trate de uma obra em tijolo, a Casa da Cultura de Beja contém uma das mais complexas construções em tijolo realizadas por Hestnes Ferreira. É uma obra onde o tijolo é pouco visível e os pormenores invulgares em pilares ou paredes não existem como na biblioteca da Moita, no entanto podem encontrar-se arcos de volta perfeita em tijolo e abóbadas também em tijolo.

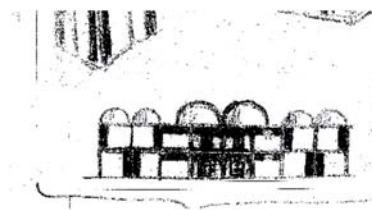
Esta obra situada num dos principais espaços no centro da cidade, é visível de todos os lados, contribuindo para o carácter formal fortemente simétrico do edifício. [Fig.22]

► Fig. 22 \_ vista aérea da Casa da Cultura de Beja.

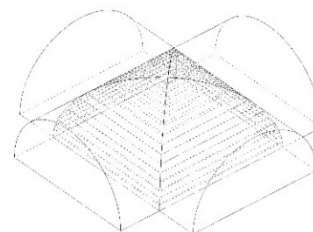




Como se destinada maioritariamente a uma faixa etária jovem, pretendeu-se dar um carácter festivo ao edifício: daí surgiu a ideia da cobertura composta por abóbadas. [Fig.23] (Neves, 2002: 87) As abóbodas tipo barrete-de-clérigo<sup>1</sup> [Fig.24] presentes neste edifício inspiram-se nas tradicionais abóbodas alentejanas reportadas no livro *Arquitectura Popular em Portugal* e é um óptimo exemplo de como Hestnes Ferreira se apoia na tradição e na história para executar as suas obras. Na altura, sendo o seu primeiro trabalho no Alentejo, Hestnes Ferreira desconhecia se haveria mão-de-obra capaz de realizar de modo tradicional as 20 cúpulas previstas na obra. (P. B. L. H. Sousa, 2002: 119-120) Segundo o próprio, perante essa dúvida perguntou ao engenheiro se seria possível realizar as abóbodas em betão caso não se conseguisse mão-de-obra capaz de as fazer em tijolo. Embora fosse possível, tal não foi preciso pois encontraram-se duas equipas de Serpa capazes de fazer o trabalho. [Fig. 25] Essas duas equipas construíram as abóbodas sem recurso a qualquer tipo de cofragem. O arquitecto lisboeta acredita que ainda hoje é possível encontrar quem trabalhe neste tipo de ofício, embora pareça estar em desuso devido à construção em betão. (c.p., 9 de Janeiro 2015)



▲ Fig. 23 \_ esboços de Hestnes Ferreira, das abóbodas de Casa da Cultura de Beja.



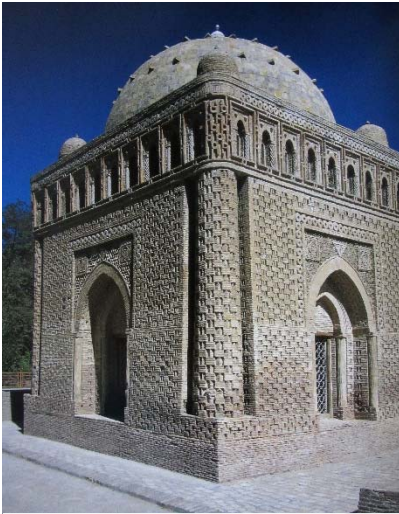
▲ Fig. 24 \_ método de construção de uma abóboda tipo barrete de clérigo.



▼ Fig. 25 \_ revestimento do exterior das abóbodas por parte das equipas de Serpa.

<sup>1</sup> Abóboda formada pelo cruzamento de duas abóbodas cilíndricas iguais. Fonte: infopedia.pt

## 2.2 \_ O tijolo na arquitectura contemporânea



▲ Fig. 26 \_ abóbada do túmulo dos Samanidas, Uzbequistão (900)

O uso do tijolo na arquitectura remonta aos primórdios da construção. O uso deste material como ornamento e forma de alcançar expressividades distintas nos edifícios tem acompanhado a história da construção e do próprio tijolo. São vários os casos de construções antigas em tijolo que têm fachadas ou pormenores construídos através de assentamentos “especiais”. [Fig. 26] A arquitectura contemporânea tem vindo a recuperar essa vontade de ornamento, não só com materiais mais dúcteis, mas também na construção em tijolo. A utilização das tecnologias de desenho e construção digital têm estimulado a possível reinterpretação e reinvenção do ornamento na arquitectura. Através dessas tecnologias é possível sair da regularidade e repetição nas formas, podendo-se criar superfícies com variações. De seguida serão apresentados três casos reais onde essas tecnologias digitais são aplicadas no desenho e desenvolvimento do projecto.

- Tongxian Gatehouse
- Z53 Social Housing
- Centro de Documentação dos Direitos Humanos

No primeiro caso a abordagem feita é ao nível da variação de textura ao longo da superfície da fachada do edifício. A abordagem do segundo e terceiro exemplo prende-se com a variação da própria fachada, sendo o efeito da variação ainda mais expressivo.

## \_ Tongxian Gatehouse

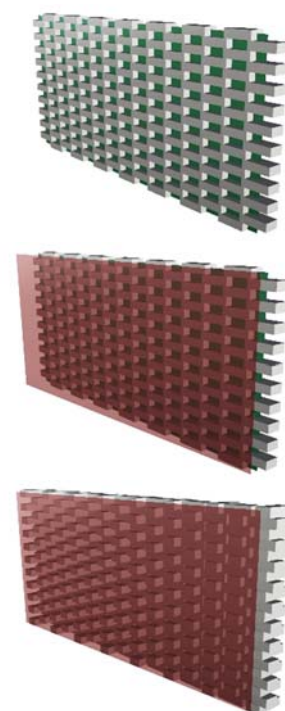
A Tongxian Gatehouse [Fig. 27], é uma obra construída pelo atelier NADAAA em 2003 para um artista chinês. *“A visível deformação do edifício é por um lado resultado das pressões programáticas que levaram à forma, bem como resultado da geometria e leis sintáticas permitidas pelas unidades de construção<sup>2</sup>.”* (Leon & Tehrani, 2002: 26) Essas unidades de construção são tijolo maciço, assente segundo uma variação do assentamento flamengo<sup>3</sup>, com os tijolos de topo salientes para o exterior da fachada [Fig. 29]. As paredes são duplas, com betão como estrutura. (Cavieres, Gentry, & Al-Haddad, 2014: 9) Isto permite uma maior liberdade plástica no trabalho do tijolo.

O desenho dos tijolos de topo é controlado parametricamente por superfícies, um processo simples se essas forem planas, mais complexo se forem de curvatura simples e ainda mais complexo se forem de dupla curvatura. Dependendo da curvatura da superfície, os tijolos podem precisar de ser cortados e a argamassa corrigida.

No entanto na Tongxian Gatehouse *“a grande parte das paredes são planas e a modesta curvatura é facilmente acomodada nas juntas da argamassa sem necessidade de cortar os tijolos”*. (Cavieres et al., 2014: 9) O processo de modelação deste tipo de parede é um processo simples, considerando que uma superfície define o plano da parede, e uma segunda superfície com o afastamento pretendido da primeira define a quantidade de tijolo que está saliente [Fig. 29]. (Cavieres et al., 2014: 9)



▲ Fig. 27 \_ vista exterior Tongxian Gatehouse.

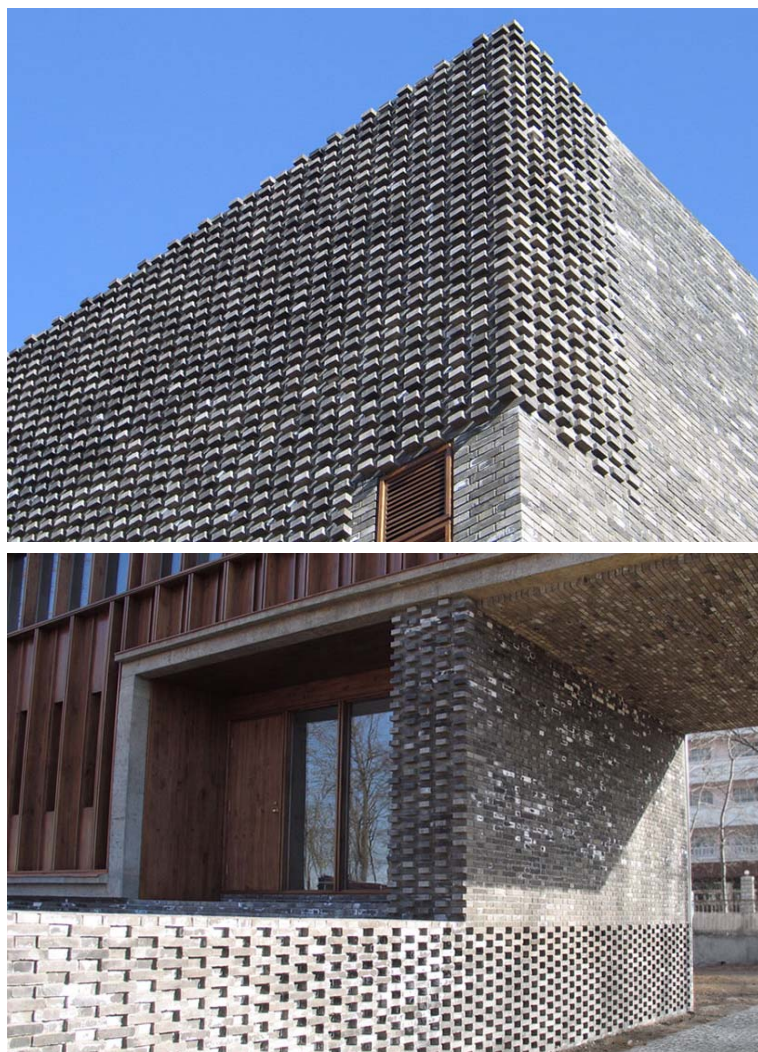


▲ Fig. 28 \_ diagrama da parametrização das paredes da Tongxian Gatehouse.

<sup>2</sup> Tradução de “the visible deformations of the body of the building are, at once, the result of programmatic pressures that guide the form, and also the result of geometric and syntactic laws permitted by particular units of construction”

<sup>3</sup> Também conhecido como assentamento gótico.

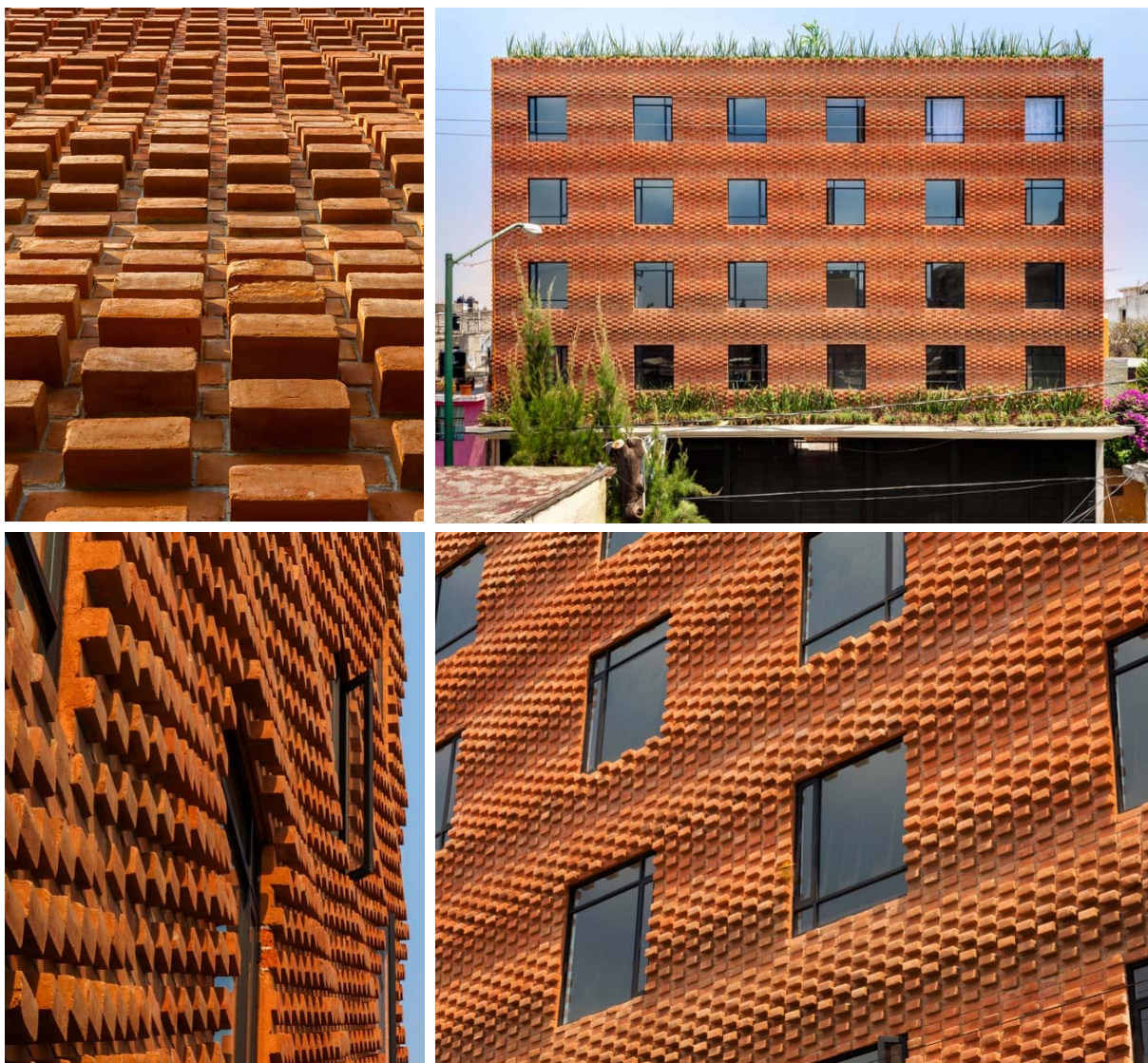




► Fig. 29 \_ pormenores da fachada da Tongxian Gatehouse.

### **\_ Z53 Social Housing**

Outro caso que evidencia a exploração da expressividade do tijolo é o edifício de habitação social Z53, da autoria de MAP/MX, construído na Cidade do México entre 2010 e 2012. O pormenor do cunhal provém do desenho da fachada tal como na Tongxian Gatehouse. No entanto a variação é mais acentuada e perceptível através do desenho das ondulações dos tijolos da fachada. [Fig. 30] Estas ondulações decorrem de processos digitais de parametrização semelhantes ao da Tongxian Gatehouse, em que uma superfície controla a localização dos tijolos de leito (que definem a fachada) e outra o afastamento dos tijolos de topo (que definem a ondulação).



▲ Fig. 30 \_ pormenores da fachada do edifício Z53.

*“O tijolo tem um papel importante no projecto, sendo parte da estrutura reinterpretando a parede tradicional de tijolo, diluindo a fronteira entre estrutura e ornamento<sup>4</sup>”. (Daniel & Guindi, 2015) os autores do projecto conseguem quebrar o pré-conceito da banalidade da construção em tijolo, e através da unidade base, o tijolo, criam fachadas heterogêneas com variações de luz e sombra<sup>5</sup>, “produzindo novas alternativas e relações entre a tecnologia e a tradição<sup>6</sup>” (Daniel & Guindi, 2015)*

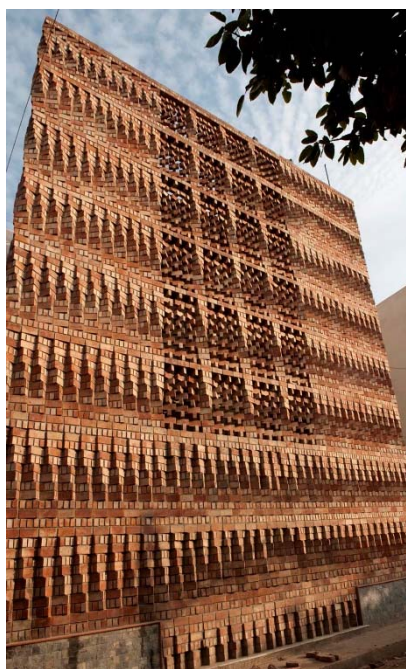
<sup>4</sup> Tradução de “The masonry brick walls play an important role on the project as they are part of the structure and re-interpret the traditional brick wall, blurring the boundary between structure and ornament.”

<sup>5</sup> Vídeo da variação de luz e sombra em <https://vimeo.com/68236641> [06.07.2015]

<sup>6</sup> Tradução de “producing new alternatives and relations between technology and tradition”



## \_ Centro de Documentação dos Direitos Humanos



▲ Fig. 31 \_ vista geral da fachada do Centro de Documentação dos Direitos Humanos Sul Asiático.

O terceiro caso considerado é uma mistura de dois pormenores na biblioteca da Moita: pilar e cunhal. Trata-se da fachada do Centro de Documentação dos Direitos Humanos Sul-Asiático, em Nova Deli, construído em 2005 pelos Anagram Architects. [Fig. 31] Neste caso existe uma rotação de um módulo composto por três tijolos a cutelo e rodados 90º em cima de outros três tijolos a cutelo. A cada cinco módulos existe um módulo alinhado com a rua. A caixa de escadas que contacta com a fachada é iluminada a partir de aberturas que são uma modificação do módulo base. A alteração prende-se com a remoção dos tijolos exteriores de cada camada do módulo, ficando assim apenas o tijolo central. Estes grupos de cinco módulos repetidos ao longo da fachada de quatro pisos<sup>7</sup> aliados às aberturas da caixa de escadas criam uma fachada “dançante” completamente deslocada da construção tradicional em tijolo. [Fig. 32]

A relação entre esta fachada e os pormenores da Biblioteca Municipal da Moita é a semelhança do conceito de rotação aplicado aos pilares de Hestnes Ferreira resolverem tanto o plano da fachada como o cunhal do edifício. E ainda a semelhança formal das aberturas da caixa de escadas com os cunhais do arquitecto português.

▼ Fig. 32 \_ pormenores da fachada do Centro de Documentação dos Direitos Humanos Sul-Asiático.



<sup>7</sup> Três pisos interiores mais o terraço.

Os dois primeiros exemplos contemporâneos apresentados resolvem o cunhal de forma semelhante ao visto na Biblioteca Municipal da Moita. O último exemplo apresenta várias semelhanças com o cunhal e os pilares da referida biblioteca embora resolvendo elementos arquitectónicos diferentes. Não querendo atribuir uma referência directa considero tratar-se de uma variação da resolução dum mesmo pormenor. Tendo, no entanto, em consideração que a construção das obras apresentadas teve lugar numa era tecnologicamente mais avançada, notando-se o uso de tecnologias digitais de desenho e de fabricação,

É notório que em todos os casos haja uma vontade de ornamentar a fachada dos edifícios. Estes projectos vão além de algumas limitações impostas pelo tijolo. Os seus autores não se conformaram com a rigidez aparente do material e inventaram novas formas criativas de o usar obtendo resultados formalmente contemporâneos. Em todos estes exemplos são exploradas as potencialidades que as tecnologias digitais de desenho e construção oferecem à arquitectura.



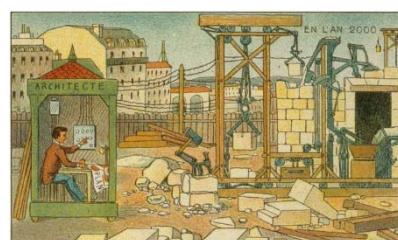


# Capítulo 3 \_ Tecnologias robóticas aplicadas ao tijolo

## 3.1 \_ Fabricação robótica na arquitectura em tijolo

### 3.1.1 \_ Introdução à tecnologia robótica

Ao longo das ultimas décadas, arquitectos têm-se voltado para a fabricação robótica embora com uma estratégia distinta da de anteriormente [Fig. 33]. As propostas deixam de ser utópicas e passam a ser exequíveis, e a sua forma de execução já não depende de robots altamente especializados mas sim de *robots* usados na indústria, na indústria automóvel, com múltiplas habilidades. [Fig.34] Esses equipamentos têm vários eixos de rotação, o que lhes dá uma grande liberdade de movimentação no espaço, podendo fazer tarefas mais complexas. (Brell-Çokcan & Braumann, 2012: 317) No entanto o que torna o uso destes braços tão fascinante na indústria criativa é a sua multifuncionalidade a relativo baixo custo<sup>8</sup>, pois, em vez de se desenvolverem máquinas especializadas em cada função, o mesmo *robot* pode ser equipado com um variado leque de ferramentas<sup>9</sup>, (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 8) tornando estes robots num “robusto, altamente adaptável e sustentável sistema de construção tanto para a pré-fabricação como para construção no local”<sup>10</sup> (Helm, Willmann, Gramazio, & Kohler, 2014: 66-67). Estes braços robóticos são de grande fiabilidade pois já se encontram na indústria há muito tempo.



▲ Fig. 33 \_ “visão do ano 2000”, por Villemard, 1910. Nesta pintura é possível ver um arquitecto a operar máquinas através de um painel de controlo.



▲ Fig. 34 \_ braços robóticos Kuka na indústria automóvel.

<sup>8</sup> Vídeo de um instalação criativa usando apenas braços robóticos em <https://vimeo.com/75260457> [20.03.2015]

<sup>9</sup> Peça que se encaixa na ponta do braço robótico (como se fosse a mão) e que é responsável pela operação que o robot executa, por exemplo fresar ou cortar.

<sup>10</sup> Tradução de “robust, highly adaptable and sustainable construction systems for both prefabrication and on-site fabrication.”

Uma das linhas de pesquisa na área da robótica, no que toca à arquitectura, prende-se no desenvolvimento de *softwares* e ferramentas que consigam concretizar as intenções arquitectónicas de cada proposta. (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 8) A união dessas tecnologias com os recentes desenvolvimentos das tecnologias de representação permitem a personalização em massa. (Piller, 2005: 318) Esta personalização permite uma resposta maior às necessidades individuais dos clientes pois os edifícios são diferentes de produtos industrializados. (Hack, Lauer, Langenberg, Gramazio, & Kohler, 2013: 287)

De acordo com Mitchell (2001: 354) “*Os arquitectos tendem a desenhar o que conseguem construir e construir o que conseguem desenhar*”, daí que a primeira aproximação da arquitectura à utilização de *robots* tenha tido um foco na resolução de falhas no trabalho manual, nomeadamente na ineficiência e na baixa produtividade.

Filippo Brunelleschi, Antoni Gaudí e Eladio Diestes tinham grande conhecimento dos princípios estruturais e uma vasta obra que o prova. [Fig. 35] No entanto “*a noção histórica de mestres de obra não se aplica mais*<sup>11</sup>”, (Cavieres, Gentry, & Al-Haddad, 2011: 718) a complexidade dos edifícios modernos levou a um aumento da especialização e uma fragmentação das disciplinas da construção. (Cavieres et al., 2011: 718) Dessa forma, a pesquisa da arquitectura na fabricação robótica está focada numa nova

▼ Fig. 35 \_ da esquerda para a direita catedral de Florença (1436) de Brunelleschi, Igreja de Cristo Obrero (1952) de Eladio Diestes, Escolas Sagrada Familia (1909) de Antoni Gaudí.



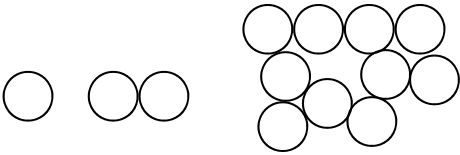

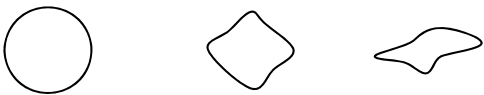
<sup>11</sup> Tradução de “this historical notion of master builders is no longer practical.”

perspectiva e abordagem ao projecto, que possibilite experimentações únicas e complexas fabricadas com a colaboração de *robots*, (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 119) resolvendo o dilema apontado por Cavieres (2011: 718), onde o desenho conceptual feito pelos arquitectos deveria estar limitado pelo sistema de construção, o que levaria a alternativas de projecto mais realistas. O desenvolvimento das tecnologias de desenho paramétrico permitiu uma melhor ligação entre a funcionalidade e o desenho em comparação com sistemas especializados e geradores de formas, oferecendo uma maior interacção com o desenho e a possibilidade de reutilizar as formas.

No campo da matéria digital existem vários processos de fabricação. [Fig. 36] A lógica de construção dos métodos aditivos é a mesma que na construção (empilhamentos de tijolos ou depósito de betão); no entanto esta tecnologia não é abundantemente usada na arquitectura corrente. Se formos comparar este método com o método substractivo<sup>12</sup>, o processo aditivo apenas coloca material onde este é necessário, evitando assim o desperdício que tem sido norma na fabricação digital na última década desses outros métodos. Não se trata apenas dum factor ecológico, mas também de tornar o custo de produção mais baixo. (Bonwetsch, Kobel, Gramazio, & Kohler, 2006: 490) Considerou-se como método aditivo o método de fabricação em que é depositado material (plástico ou betão por, exemplo). Uma vez que o assentamento de tijolo não exige desgaste de um material, este método de fabrico apresentado insere-se também no campo da fabricação aditiva.

---

<sup>12</sup> Por exemplo a fresagem de peças onde um bloco de material é desbastado.

Método	Exemplo	Descrição	Esquema do processo
Aditivo	Stereo-litografia (impressão 3D)	O material é depositado em pequenas porções na forma pretendida.	
Subtractivo	Fresagem, corte	A partir de um bloco de material este é removido gradualmente até atingir a forma desejada.	
Formativo	Prensagem	É aplicada uma força em vários pontos de um material maleável para lhe conferir uma determinada forma.	

▲ Fig. 36 \_ quadro demonstrativo dos processos de fabricação. (quadro baseado em Bonwetsch et al., 2006: 491)

O *robot* permite ser equipado para desempenhar qualquer um dos processos apresentados na Fig. 36. Esta versatilidade é mais uma prova do quão útil podem ser estas máquinas na arquitectura.

Embora as tecnologias de fabricação digital possam substituir o trabalho humano por trabalho mecânico, uma combinação dos dois por vezes é uma possibilidade viável, facilitando os processos de fabricação. Brell-Çokcan & Braumann (2013: 14) defendem essa combinação dizendo que “*enquanto que as máquinas são capazes de processar uma quantidade infindável de números apenas o ser humanos consegue interpretar o seu significado*<sup>13</sup>”, o que resulta numa interacção entre Homem e máquina que tira partido do que cada um é capaz de melhor fazer. A vasta gama de tarefas que o *robot* é capaz de executar com uma grande eficiência, precisão e flexibilidade, faz com que a sua utilização seja uma mais-valia para a arquitectura, pois o *robot* permite a implementação de processos de trabalho personalizado em vez de sequências de construção repetitivas e

<sup>13</sup> Tradução de “while the machine with its numerical logic can rule over an infinitely large quantity of numbers, only human beings with their cognitive abilities and intuitive approaches can recognize meaning in them”

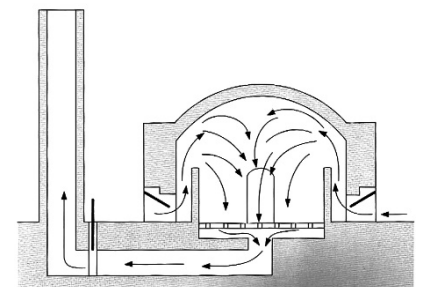
uniformes. A grande conquista é que essa eficiência, precisão e flexibilidade são aplicadas directamente no pensamento do projecto.

As capacidades humanas não são desvalorizadas mas sim expandidas através da “operacionalidade” dos *robots*. Dessa forma não estão mais presos ao processo físico de fazer coisas mas também ligados à criação conceptual e projectual. (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 24) Segundo Mario Carpo (2001) a divisão entre o acto de desenhar e construir conhecida desde o Renascimento, diluiu-se: através da sua “operacionalidade”, o *robot* não está mais exclusivamente ligado à produção e manuseamento material, tendo uma grande influência durante o pensamento projectual programado que concebe arquitectura.

### 2.3.2 Exemplos de aplicação

O tijolo como o conhecemos hoje remonta a meados do século XIX; durante a industrialização, com a “invenção<sup>14</sup>” dos fornos de corrente ascendente. (Campbell, 2005: 210) [Fig. 37] Desde então, as técnicas de produção do tijolo têm sido melhoradas e automatizadas. Por outro lado as técnicas de assentamento mantiveram-se praticamente estagnadas e consequentemente manuais. (Campbell, 2005: 301-303) Embora o uso de robots para a automatização da aplicação de tijolo seja alvo de pesquisas que duram há décadas, o seu potencial expressivo através da parametrização da posição dos tijolos com processos robotizados só teve relevância para arquitectos muito recentemente.

Até recentemente os *softwares* de desenho usados (CAD) não eram capazes de lidar com este novo interesse de projecto e com os processos de fabricação associados aos braços robóticos: apresentavam-se demasiados básicos e dependem, ainda de que



▲ Fig. 37 \_ esquema do funcionamento de um forno de corrente ascendente.

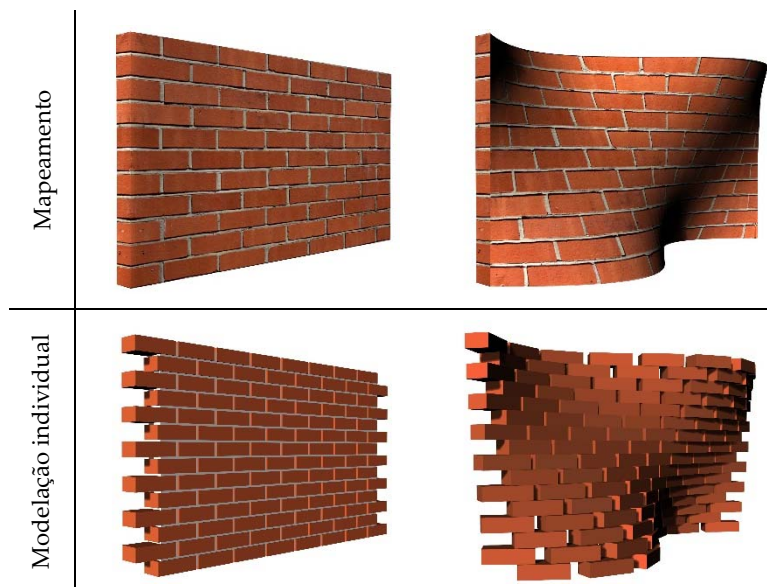
---

<sup>14</sup> Os fornos de corrente ascendente já eram usados pelos chineses durante a dinastia Ming, mas apenas no século XIX os europeus os desenvolveram de forma a fabricar tijolos.

o desenhador desenhe todo o projecto. Dando como exemplo uma parede convencional em tijolo, num *software* de CAD apenas se teriam de definir os limites do material, sem ter de especificar a posição de cada tijolo. Embora seja perfeitamente possível erguer uma parede em tijolo cujo desenho são apenas os limites, que implicam saber a dimensão e direcção do tijolo, para se obter um bom desenho de alçado este deve ser pensado e desenhado tijolo a tijolo. (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 102-103) No entanto, a conclusão à qual Brell-Çokcan e Braumann chegaram é que os *softwares* de CAD não contêm nenhuma ferramenta que consiga desenhar os tijolos individualmente<sup>15</sup>, nem mesmo numa parede simples. Seria, portanto, demasiado moroso e trabalhoso a partir de um *software* convencional de CAD explorar o desenho possível através de fabricação digital pois tal implicaria a modelação de cada tijolo, posicionando-os “manualmente” no espaço. (Cavieres et al., 2011: 718) Outra desvantagem do CAD tradicional seriam as alterações e modificações de projecto. Estas implicariam o redesenho de toda a assemblagem, movendo e alterando cada tijolo já posicionado – um processo moroso e propenso a erro. Este processo desencoraja quaisquer tentativas de alteração, levando os projectistas a cair na tentação de acreditarem que as primeiras hipóteses são de qualidade suficiente, ou ficando-se pelo trivial, não explorando hipóteses alternativas. (Cavieres, Gentry, & Al-Haddad, 2009: 545) Na Fig. 38 é possível ver uma comparação entre paredes onde é aplicada uma textura num programa de CAD, e paredes onde os tijolos são modelados individualmente.

---

<sup>15</sup> Excepto tramas ou texturas por mapeamento, mas esses processos tratam-se apenas de representações 2D que não acrescentam informação tridimensional ao desenho, essencial para a fabricação.



◀ Fig. 38 \_ comparação entre um render com textura e um modelo com tijolos modelados individualmente

Sendo que “as boas soluções normalmente surgem da comparação exhaustiva de diferentes modelos duma grande variedade de alternativas<sup>16</sup>” (Cavieres *et al.*, 2009: 545) seria preciso um *software* que em vez de ser uma ferramenta de representação, interpretasse a ideia do projecto e ainda controlasse o braço robótico, combinando assim o desenho digital com a fabricação robótica. Deste modo, a principal preocupação não se trata da realização do desenho ou da imagem, mas sim do comportamento e sistema construtivo da forma criada. Lee, Eastman e Sacks (Cavieres *et al.*, 2009: 546) chamam-lhe o método “*construir o comportamento do objecto*”. O comportamento do objecto é a capacidade dos componentes do objecto responderem a estímulos preservando o conceito original. Dessa forma os objectos têm de ser modelados não apenas pelo seu aspecto, mas tendo também em conta as relações entre eles. (Sacks, Eastman, & Lee, 2003: 6-7)

Foi durante as décadas de 80 e 90 que os *robots* começaram a ser introduzidos na arquitectura pela indústria japonesa. O seu principal objectivo era substituir o trabalho do homem com

<sup>16</sup> Tradução de “good solutions often emerge from exhaustive comparison of different models from a wider pool of alternatives.”



construção *in-situ*, mas isso exigia um nível de *standardização* tal que a arquitectura se tornaria demasiado repetitiva e inflexível.(Hack et al., 2013: 287) desta forma, actualmente podem-se considerar duas tendências no uso da fabricação robótica. A primeira prende-se com a utilização destas tecnologias para a realização de paredes convencionais, mas de forma mais rápida e eficaz.

Segundo Campbell (2005: 303) “*não existem máquinas automáticas de assentar tijolos*”, em contrapartida em 2011 começou-se a construção de um protótipo capaz de executar esse trabalho. Desenvolvido pela Contruction Robotics S.A.M., é um robot capaz de autonomamente contruir uma parede plana em tijolo<sup>17</sup>. (Peters & Belden, 2014a) [Fig. 39]



► Fig. 39 \_ modelo tridimensional exemplificativo do funcionamento do S.A.M.

Este sistema é composto por um braço robótico que coloca os tijolos no local correcto com a ajuda de um laser. A colocação da argamassa também está automatizada sendo feita por um dispensador que a coloca em duas faces do tijolo. (Peters & Belden, 2014b)

A segunda tendência trata-se da tendência abordada neste trabalho: a utilização das tecnologias de fabricação robótica para a criação de paredes diferentes da convencional parede plana.

---

<sup>17</sup> Vídeo demonstrativo em <https://youtu.be/OKoQMD0QZQs> [13.07.2015]



Esta abordagem permite ultrapassar os constrangimentos impostos pela *standardização* e materializar outros conceitos formais. (J. P. Sousa, Varela, & Martins, 2015: 2) [Fig.40]

Cavieres (2009: 545) realçou a importância da inserção de ferramentas digitais paramétricas na fase conceptual de projecto afirmando que esses desenvolvimentos apontavam para que as formas simplificadas da construção em tijolo fossem substituídas por geometrias expressivamente modeladas. No entanto, a falta de *software* apropriado fez com que os *scripts*<sup>18</sup> fossem demasiado específicos, impossibilitando a sua generalização. “*As limitações do software estavam a contrastar com as possibilidades abertas pela fabricação robótica*”<sup>19</sup> (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 104).

Segundo Robert Aish (2005) o desenho baseia-se na criação de regras que rejam as relações entre os componentes desenhados. No desenho paramétrico essa relação pode ser expressa em termos geométricos ou matemáticos, enquanto no desenho convencional essas regras ficam “*implícitas, escondidas na geometria enquanto as regras que definem as relações apenas existem na mente do desenhador*”<sup>20</sup>. (Katz, 2007: 2)

Assim nasceu o *BrickDesign*<sup>21</sup> trata-se de um *plugin*<sup>22</sup> compatível com *softwares* de CAD, [Fig. 41] que permite o desenho de elementos em tijolo parametricamente. O *plugin* gera automaticamente tijolos baseando-se na posição de tijolos definidores. O *BrickDesign* aborda as dificuldades e limitações sentidas anteriormente, sendo um ponto de partida para a ligação do desenho digital com o processo de fabricação robótica.

---

<sup>18</sup> Conjunto de instruções em código para que uma função seja executada numa aplicação. Fonte: infopedia.pt

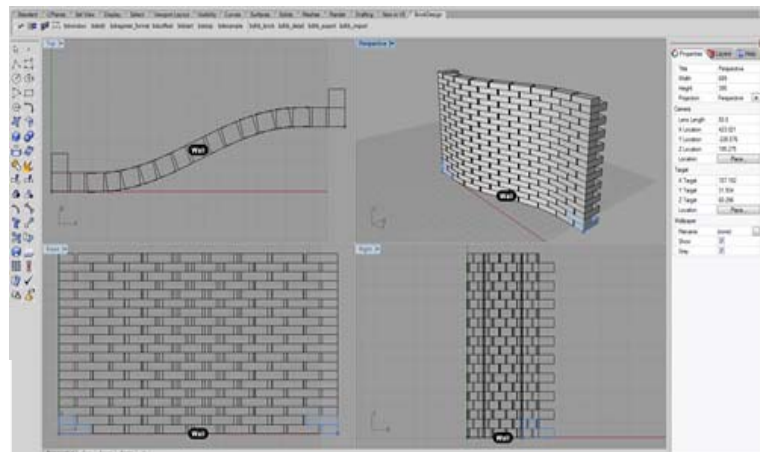
<sup>19</sup> Tradução de “The limitations of the design tools contrasts with the possibilities opened up by the robotic fabrication process.”

<sup>20</sup> Tradução de “implicit, hidden behind the geometry while the rules that define relationships only exist in the mind of the designer”.

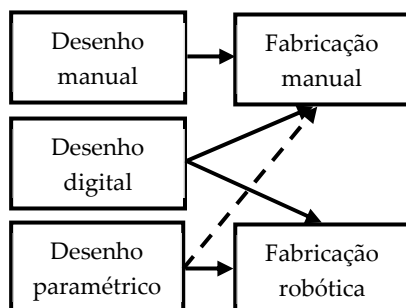
<sup>21</sup> O *BrickDesign* trata-se de um exemplo para ilustrar a potencialidade de *softwares* de parametrização em estruturas de tijolo. O seu modo de funcionamento assemelha-se a outros *softwares* para o mesmo efeito.

<sup>22</sup> Componente de um *software* que adiciona novas funcionalidades ao mesmo. Fonte: infopedia.pt

(Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 105) Todo este processo é parametrizado, sendo que a posição de cada detalhe depende dos objectos adjacentes. Qualquer alteração é feita em tempo real para que o utilizador tenha *feedback* imediato, “o que faz com que o modo [de trabalho] *paramétrico* seja o ideal para a exploração de projecto<sup>23</sup>”. (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 106-107)



► Fig. 40 \_ ambiente do Rhinoceros usando o BrickDesign.



▲ Fig. 41 \_ diagrama das relações de exequibilidade entre os diferentes tipos de desenho e fabricação.

Os novos processos de fabricação robótica exigem novas ferramentas de desenho, a fim de se explorar todo o potencial deste processo de fabrico. Esses parâmetros têm de ser considerados numa fase preliminar do projecto e influenciarão o processo de procura do projecto. O controlo digital do desenho e a construção através do *robot* permite saber-se com precisão o local e direcção de cada peça individual e “permite a exploração de soluções diferentes do comum trabalho com tijolo.<sup>24</sup>” (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 108) Dada a potencialidade destes *robots*, considero pertinente a exploração destas tecnologias não só de forma a superar as limitações ao nível formal e estrutural do assentamento manual de tijolo como também acelerar o seu processo. Para tal é essencial a utilização dos métodos de desenho digitais actuais de modo a permitirem formas mais complexas e os cálculos estruturais dessas mesmas formas. [Fig. 41] Com o intuito de demonstrar as potencialidades destas

<sup>23</sup> Tradução de “makes the parametric mode an ideal environment for design exploration and fine tuning the overall geometry”

<sup>24</sup> Tradução de “allows the exploration of design solutions outside the commonly known standards of brickwork.”

tecnologias e processos, serão apresentados alguns projectos relevantes ao estudo feito neste trabalho por via a dar a entender o que é que as tecnologias de fabricação digital e robótica permitem à arquitectura conceber, assim como enumerar as vantagens e identificar as dificuldades enfrentadas com esta abordagem. Destacam-se os trabalhos realizados por Fabio Gramazio e Matthias Kohler, pioneiros na utilização de braços robóticos na execução de elementos arquitectónicos. A selecção deste trabalho incidiu na evolução da abordagem aos projectos usando as tecnologias de desenho e fabricação digital.

- Freeform catalan thin-tile vaults
- Gantenbein winery
- Structural Oscillations
- Structural Oscillations e Pike Loop
- Flight assembled architecture

O primeiro trabalho é um exemplo de desenho e concepção digital mas com construção manual. Os restantes são de desenho e construção digital, em que a sua sequencia expõe uma evolução na resolução das limitações encontradas pelos arquitectos.

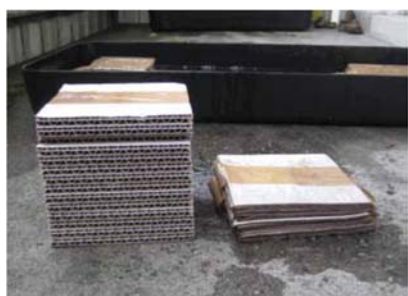
#### **\_ Freeform catalan thin-tile vaults**

Trata-se de um protótipo temporário para abóbadas de curvatura dupla realizado pelo BLOCK Research Group. O desenho foi realizado num *plug-in* chamado TNA que proporciona a optimização de abóbadas permitindo criar outro tipo de apoios para além dos arcos clássicos. Embora todo o processo de desenho tenha sido através de meios digitais, a construção foi manual.



▲ Fig. 42 \_ diagrama da construção da abóbada.

Após a criação e revisão da superfície no TNA, o desenho da localização dos tijolos é feita através de um *offset* dos limites da superfície com as dimensões do tijolo. Esses *offsets* precisam de ser perpendiculares entre si e a intersecção deve ser feita ao longo do cume das abóbadas. A estrutura necessita de uma a três camadas, pelo que os investigadores optaram por duas camadas na “casca” e três no reforço dos arcos. (Beorkrem, 2013: 143-144) Para suportar a estrutura durante a construção foi usada uma cofragem de cartão canelado<sup>25</sup> com paletes<sup>26</sup> a servir de base e enchimento nos cumes. [Fig. 42] Essa cofragem foi feita através da projecção de uma grelha na geometria da abóbada. A “grelha tridimensional” era formada por várias caixas adjacentes que foram planificadas e cortadas recorrendo a uma máquina CNC. (Davis, Rippmann, Pawlofsky, & Block, 2012: 48) A estrutura requeria que a cofragem fosse retirada o mais uniformemente possível, evitando que uma carga irregular causasse uma ruptura. (Beorkrem, 2013: 145) O engenhoso sistema usado consistia em apoiar as paletes em blocos de cartão canelado [Fig. 43] que após a construção seriam molhados e assim cederiam ao peso da cofragem deixando de suportar a estrutura. (Davis, Rippmann, Pawlofsky, & Block, 2011: 5-6)



▲ Fig. 43 \_ teste dos blocos de cartão canelado usados para suportar a estrutura, seco (à esquerda) e após ser molhado (à direita).

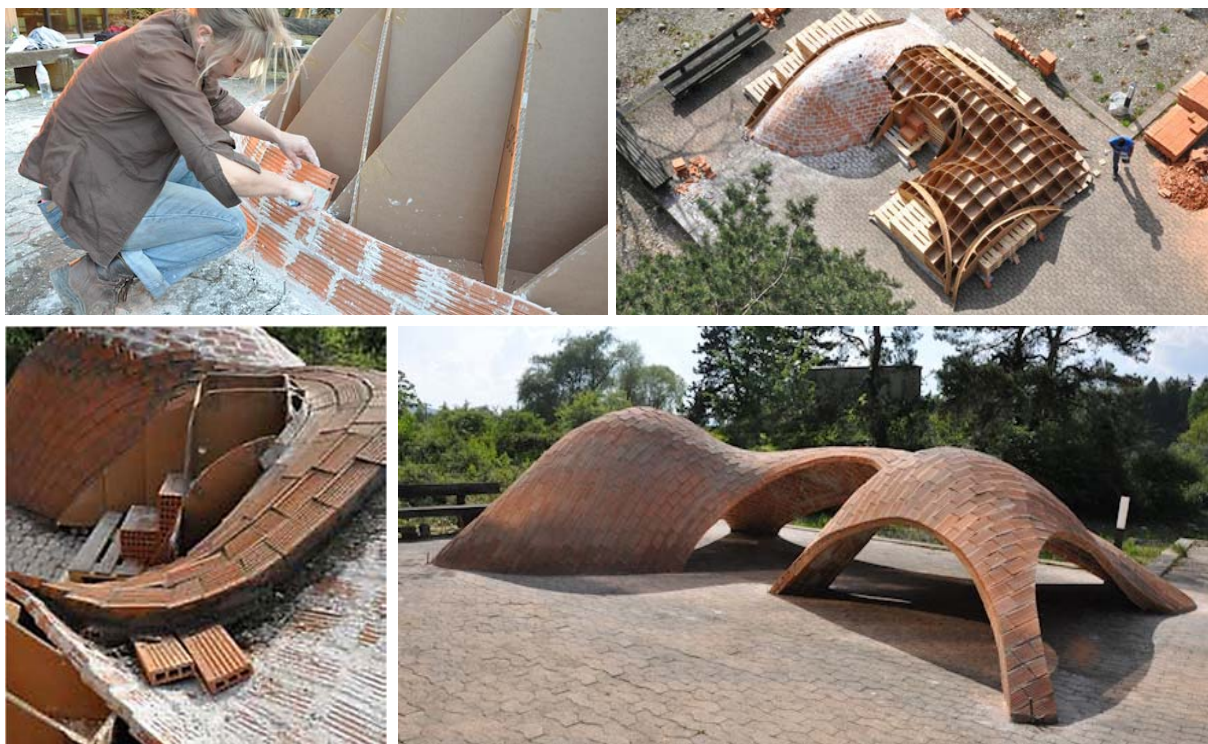
Uma vez terminada a primeira camada, a camada de reforço é feita de forma a facilitar a distribuição de cargas até ao solo; e depois a terceira camada é colocada num processo semelhante à primeira mas numa direcção perpendicular, aumentando a resistência de toda a estrutura<sup>27</sup>. [Fig. 44] Após se completar a construção, esta foi carregada com cerca de três toneladas para testar a sua resistência a cargas, tendo sido demolida<sup>28</sup>. (Beorkrem, 2013: 146)

<sup>25</sup> Por se tratar de um material barato e reciclável, e tendo em conta o peso do tijolo usado, o cartão seria suficientemente resistente para suportar a construção.

<sup>26</sup> Para reduzir a quantidade de material, bem como aumentar a resistência diminuindo a altura das longarinas de cartão.

<sup>27</sup> Vídeo da construção em <https://vimeo.com/25703577> [18.05.2015]

<sup>28</sup> Vídeo da demolição em <https://vimeo.com/60064510> [21.05.2015]



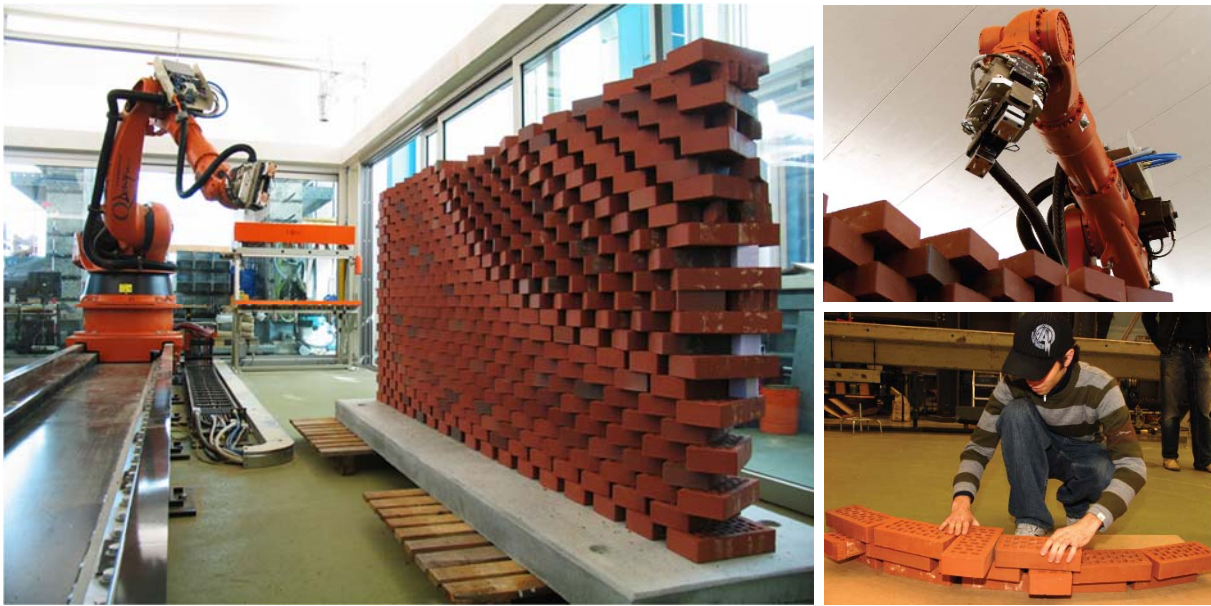
### \_ The programmed wall

Este projecto integrou num *workshop* realizado em 2006 em que Fabio Gramazio e Matthias Kohler, juntamente com estudantes, exploraram o potencial das tecnologias de fabricação robótica. O tema prendia-se com: na possibilidade das condições de construção migrarem da fabricação manual para a fabricação robótica, que potencial ao nível do desenho se poderia retirar de um dos mais antigos e comuns materiais de construção, o tijolo. (Gramazio & Kohler, 2014d)

O projecto foi todo desenvolvido digitalmente e contruído com recurso a um braço robótico. [Fig. 45] O desafio era criar uma parede com 3x2m na qual o *robot* deveria ser capaz de colocar todas as peças sem intervenção exterior. Numa primeira aproximação, os estudantes criaram manualmente os seus conceitos de forma a verificarem as regras de montagem. Após essa verificação, é criado um *script* baseado nessas regras. (Bonwetsch et al., 2006: 492) Os alunos definiam a lógica de construção das paredes e não a sua forma.

▲ Fig. 44 \_ da esquerda para a direita colocação da primeira camada de tijolos por cima da estrutura em cartão canelado, vista geral da abóbada em construção, pormenor da camada de reforço, abóbada completa.





▲ Fig. 45 \_ da esquerda para a direita construção de um protótipo recorrendo ao braço robótico, ferramenta que agarra os tijolos usada no *workshop*, criação manual do conceito.

Foram construídos três protótipos [Fig. 46] que, se por um lado reflectem a presença arcaica do material, por outro demonstram características diferenciadas do seu processo de concepção e fabrico. Em Bonwetsch *et al.* (2006: 493-494) é referido que este *workshop* serviu de protótipo para um projecto<sup>29</sup> em que Gramazio e Kohler trabalhariam no sentido de desenvolver uma fachada em tijolo em vários módulos. Módulos esses assentes em lintéis de betão que seriam montados posteriormente no local. Melhoramentos foram feitos, optimizando o *script* do *robot* bem como a automatização da aplicação das resinas que colam os tijolos reduzindo para metade o tempo de colocação de cada um. No entanto, o objectivo do *workshop* seria explorar novas possibilidades de desenho potenciadas por estas tecnologias e não tanto a optimização do processo.

▼ Fig. 46 \_ protótipos realizados no *workshop*.



<sup>29</sup> Gantenbein Winery.

## \_ Gantenbein winery

A fachada da Gantenbein winery (2006) [Fig.47] foi desenvolvida no ETH de Zurique, por Gramazio e Kohler. O projecto consiste na execução de uma fachada com uma estrutura em betão e o preenchimento em tijolo. Segundo os arquitectos “os tijolos estão desfasados, pois assim a luz pode penetrar o hall através dos espaços entre tijolos. A luz solar directa, que teria um efeito prejudicial na fermentação, não é sentida<sup>30</sup>”. (Gramazio & Kohler, 2014b)

▼ Fig. 47 \_ da esquerda pra a direita alçado principal, vista interior do hall, pormenor da fachada, aplicação dos painéis na fachada.

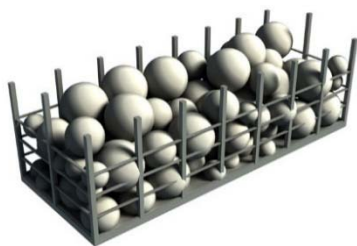


O método usado permitiu depositar com precisão cerca de 20.000 tijolos segundo parâmetros pré-estabelecidos num *software* de desenho tridimensional que define o ângulo e o espaçamento dos tijolos<sup>31</sup>. Isto permitiu que os arquitectos conseguissem, previamente, estudar e testar digitalmente os padrões da fachada e com isto controlar a permeabilidade e textura dos mesmos, criando o efeito desejado.

<sup>30</sup> Tradução de “The bricks are offset so that daylight penetrates the hall through the gaps between the bricks. Direct sunlight, which would have a detrimental effect on the fermentation, is however excluded”

<sup>31</sup> Vídeo do processo de construção disponível em <https://vimeo.com/69252842> [20.04.2015]





▲ Fig. 48 \_ *de cima para baixo* modelo tridimensional que originou o desenho da fachada, painéis pré-fabricados prontos para serem transportados para a obra.

Como cada tijolo tem um ângulo distinto, a luz é reflectida de forma desigual pela fachada e as sombras resultantes criam uma imagem que se assemelha a bagos de uvas. A partir de uma superfície bidimensional criou-se uma interacção entre plasticidade, profundidade e cor – um efeito tridimensional que varia consoante a posição do observador e o ângulo do sol. A fachada é composta por 72 painéis pré-fabricados nas instalações do ETH Zurich<sup>32</sup> e mais tarde transportados para o local. [Fig. 48]

Este trabalho sobre o tijolo é fascinante, pois à primeira vista este material é visto como limitado e rígido que não permite grande liberdade formal, no entanto “o observador é surpreendido pelo facto das suaves formas redondas [das uvas] serem, efectivamente compostas por tijolos individuais<sup>33</sup>”. (Gramazio & Kohler, 2014b) Com este projecto provaram que o braço robótico não é apenas capaz de replicar a mão-de-obra humana mas sim capaz de ir para além disso, criando elementos que seriam virtualmente impossíveis de realizar recorrendo somente a mão-de-obra humana. (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 9)

### \_ Structural Oscillations e Pike Loop



▲ Fig. 49 \_ R-O-B a construir um módulo da instalação.

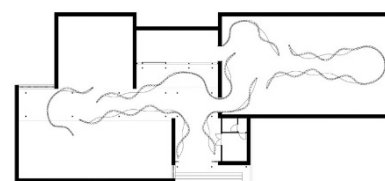
As pesquisas e desenvolvimentos das investigações de Gramazio e Kohler em paredes de tijolo com padrões paramétricos culminam numa instalação para a 11ª Bienal de Veneza (2008). Contaram com um braço robótico de 5 eixos, que aplicaram a um contentor com um carril que serviria de 6º eixo ao qual chamaram R-O-B. [Fig.49] A portabilidade deste sistema permite expandir o universo de possibilidades de como a fabricação digital e robótica pode redefinir os processos convencionais de construção. (Beorkrem, 2013: 137) Este sistema “portátil” de construção estende o processo de pré-fabricação, pois o robot consegue construir *in-situs*. (Gramazio & Kohler, 2014e)

<sup>32</sup> Vídeo da construção em <https://youtu.be/kDW6XCB7HPE> [20.04.2015]

<sup>33</sup> Tradução de “The observer is surprised that the soft, round forms are actually composed of individual, hard bricks.”



A instalação, com cerca de 100m e 15.000 tijolos, pretendia percorrer o Pavilhão Suíço a partir da entrada, dando a volta e terminando no ponto de partida, dialogando com o edifício modernista em tijolo desenhado por Bruno Giacometti. [Fig. 50] (Gramazio & Kohler, 2014f) Com 6 aberturas, permitia aos utentes explorar ambos os lados da parede. Nos troços onde a parede fazia um percurso mais rectilíneo a instalação ondula, sendo que a base e o topo ondulavam em direcções opostas criando, além de maior estabilidade, uma maior plasticidade [Fig. 51]. Devido às limitações em dimensão do *robot*, a instalação foi feita em segmentos de 4m [Fig. 52], que seriam montados no exterior do pavilhão e mais tarde unidos no local em segmentos maiores. A ferramenta usada neste *robot* foi uma garra que apanhava os tijolos de um tapete rolante, e os levava até um dispensador de resina<sup>34</sup> antes de os posicionar no local correcto<sup>35</sup>. (Beorkrem, 2013: 139)



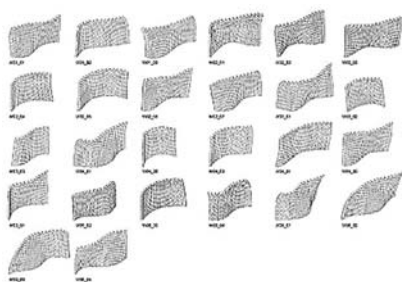
▲ Fig. 50 \_ implantação da instalação no pavilhão Suíço.



▼ Fig. 51 \_ vistas da instalação a partir do interior do pavilhão.

<sup>34</sup> Procedimento proveniente da optimização de construção da Programmed Wall apresentada anteriormente.

<sup>35</sup> Vídeo da construção em <https://vimeo.com/69236155> [05.05.2015]



▲ Fig. 52 \_ conjunto de módulos que compõem a instalação.

Ao nível da programação, a forma da instalação dependia das dimensões da unidade (tijolo). Tomando como exemplo as ondulações opostas da base e topo da parede, as distâncias das cristas e barrigas da onda (em planta) têm de ter em conta o número total de camadas de tijolo e a quantidade de tijolo que tem de ficar apoiado para manter a estabilidade da estrutura. Por isso, a geometria não pode ser completamente aleatória, estando limitada a alguns parâmetros. A concepção desta instalação começou pela criação da superfície pretendida e a sua divisão em altura, tendo em conta a altura do tijolo. Cada uma das linhas resultantes da divisão é dividida tendo em conta metade do comprimento do tijolo e adicionando um pequeno espaço encontrando-se assim o centro de cada tijolo. (Beorkrem, 2013: 138-140) O espaço serve para permitir a rotação dos tijolos; esta é dada pela tangente no ponto central de cada tijolo. (Gramazio & Kohler, 2014f) Esta rotação dá à instalação alguma permeabilidade à luz, acentuando a sua expressividade. O passo final é desenhar a base dos tijolos e fazer uma extrusão consoante as dimensões pré-estabelecidas. (Beorkrem, 2013: 141)

O projecto do Pike Loop é uma instalação pública em 2009 em Manhattan. Este trabalho usa os mesmo princípios e equipamentos que o Structural Oscillations. A instalação tem 22m de comprimento e é construída por mais de 7.000 tijolo<sup>36</sup>. [Fig. 53] (Gramazio & Kohler, 2014c)

▼ Fig. 53 \_ vista geral da instalação.

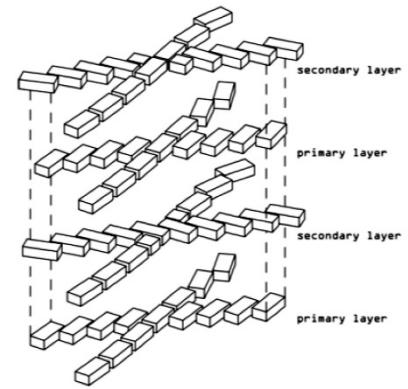


<sup>36</sup> Vídeo da construção em <https://vimeo.com/69255930> [16.09.2015]

A instalação corre ao longo do passeio, num *loop* ondulado infinito que se intersecta e interlaça. “Na variação de ritmo, o *loop* eleva-se do chão e intersecta-se nas suas cristas e barrigas”<sup>37</sup>. (Gramazio & Kohler, 2014c)

O *loop* tem um modo de construção para cada sentido. Num deles os tijolos são paralelos mas vão avançando em relação ao anterior, enquanto que no outro sentido os tijolos são colocados em fila. [Fig. 54] No caso do sentido em que os tijolos são paralelos, estes rodam 90° alternadamente em relação às camadas adjacentes. No caso dos tijolos colocados em fila, existe um desfasamento entre camadas. Isto permite um entrelaçamento na estrutura que faz uma compressão nos tijolos permitindo a sua elevação. (Bärtschi, Knauss, Bonwetsch, Gramazio, & Kohler, 2010: 139-144)

O desenho da instalação teve de lidar com o enorme peso dos tijolos, e para contornar esse problema o *loop* ao elevar-se é “esticado”, aumentando o afastamento entre tijolos reduzindo o peso da parte suspensa. Para a execução deste trabalho foi usado o R-O-B pois “a forma contínua e a expressão homogénea da estrutura apenas consegue ser atingida através da fabricação digital no local”<sup>38</sup> [Fig. 55] (Gramazio & Kohler, 2014c)



▲ Fig. 54 \_ esquema explicativo da construção das intersecções.



▼ Fig. 55 \_ da esquerda para a direita intersecção da estrutura, R-O-B construindo um segmento da instalação.

<sup>37</sup> Tradução de “In changing rhythms the loop lifts off the ground and intersects with itself at its peaks and valleys.”

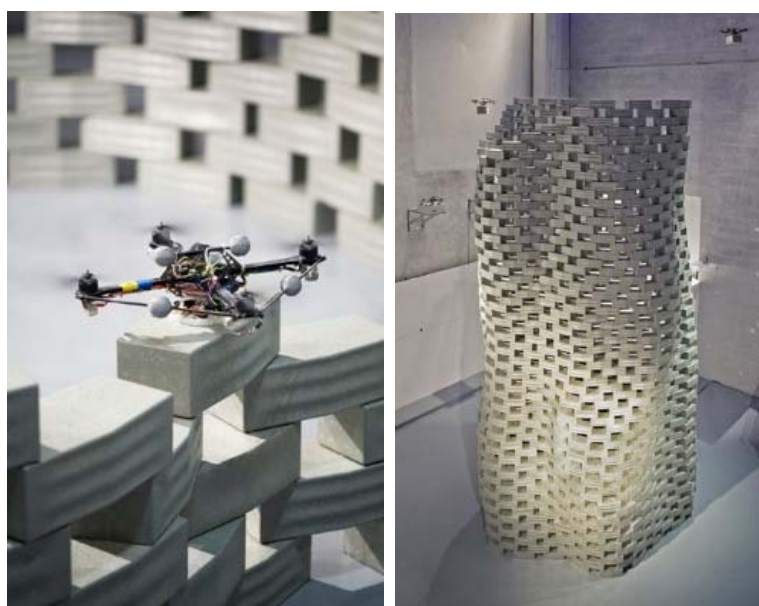
<sup>38</sup> Tradução de “the continuous form and homogeneous expression of the structure can only be achieved through on site digital fabrication.”



### **\_ Flight assembled architecture**

Este projecto mostra que as tecnologias emergentes de fabricação robótica e digital estão a evoluir no sentido de tornar possível e executável a utopia arquitectónica de criar edifícios parametrizados. Este projecto, da Fonds Régional d'Art Contemporain (FRAC), representa a primeira instalação arquitectónica em todo o mundo realizada com drones<sup>39</sup>. A partir deste tipo de tecnologia de construção será possível construir edifícios inteiros, de uma só vez, sem ter de recorrer a módulos de construção.

► **Fig. 56** \_ construção do protótipo da FRAC *da esquerda para a direita* um dos drones responsáveis pela montagem da instalação, instalação quase completa.



Os responsáveis pelo projecto foram mais uma vez Fabio Gramazio, Mathias Kohler, desta feita com Raffaello D'Andrea. Para este projecto, drones propulsionados por quatro hélices<sup>40</sup> juntaram mais de 1.500 blocos numa estrutura formalmente complexa com 6 metros de altura<sup>41</sup>. [Fig. 56] Os drones eram comandados por algoritmos matemáticos e o desenho dos seus percursos pré-determinados permitia que estes transportassem os blocos desde uma plataforma até ao local de construção sem que chocassem entre si, pousando os blocos na posição correcta

<sup>39</sup> Qualquer veículo controlado remota ou automaticamente. fonte: infopedia.pt

<sup>40</sup> Desenvolvidos por Raffaello D'Andrea

<sup>41</sup> Vídeo da construção em <https://vimeo.com/69257453> [20.04.2015]

e sem qualquer tipo de intervenção humana. (Brell-Çokcan & Braumann, 2013: 16-17)

A instalação representa um modelo à escala 1:100 de um possível edifício modular de 600 metros de altura que albergaria cerca de 30.000 habitantes. [Fig. 57] *“É a partir dessa busca de um habitat auto-sustentável “ideal” que os autores [deste projecto] perseguem uma forma nova e radical de pensar e materializar verticalmente na arquitectura<sup>42</sup>”*. (Gramazio & Kohler, 2014a)



▲ Fig. 57 \_ simulação 3D do projecto da FRAC.

---

<sup>42</sup> Tradução de “It is from this quest of an “ideal” self-sustaining habitat that the authors pursue a radical new way of thinking and materializing verticality in architecture”



# Capítulo 4 \_ Investigação prática sobre desenho e construção digital em tijolo

## 4.1 \_ Problemática

Ao longo da sua história, o tijolo passou por diferentes processos de manufatura e foi usado de várias formas na construção. Com o recente anseio por novas formas, cada vez mais complexas, nos mais distintos materiais, o tijolo foi perdendo o lugar de material de eleição para outros materiais que permitiam uma maior liberdade formal e expressiva. No entanto, devido ao trabalho e pesquisa contínuos de vários arquitectos, nomeadamente Gramazio e Kohler, no campo da fabricação robótica na arquitectura com o tijolo, é hoje possível retirar desse material um nível de plasticidade sem precedentes. Para tal usam nas suas experiências e projectos um braço robótico usado na indústria que, segundo estes, *“permite implementar o princípio aditivo a uma escala arquitectónica”*<sup>43</sup> (Gramazio & Kohler, 2008: 9) e *“conecta a realidade digital do computador com a realidade material da arquitectura construída”*<sup>44</sup>. (Gramazio & Kohler, 2008: 8)

Atendendo a esta ânsia por novos conceitos, o conhecimento adquirido sobre as tecnologias e os processos de fabricação robótica e o valor histórico do material *“representando um dos elementos primários do processo de construção arquitectónico”*<sup>45</sup> (Bonwetsch et al., 2006: 492) a presente dissertação consiste na

---

<sup>43</sup> Tradução de “The industrial robot enables us to implement this additive principle on an architectural scale”

<sup>44</sup> Tradução de “The robot connects the digital reality of the computer with the material reality of built architecture”

<sup>45</sup> Tradução de “They [bricks] represent one of the primary elements of an architectural build-up process”

investigação de um modo de aplicação desses mesmos processos em obras já construídas, não com o intuito de mimetizar o existente, mas sim da aplicação do mesmo conceito plástico a formas complexas explorando os limites do material através da utilização de tecnologia robótica, pois *“uma vez que a construção em tijolo é baseada na assemblagem repetitiva de inúmeras unidades físicas semelhantes, este tem um forte potencial para ser automatizado<sup>46</sup>”* (J. P. Sousa et al., 2015: 3). Os casos de estudo compreenderão elementos excepcionais de obras em tijolo do Arq. Hestnes Ferreira apresentadas no início do presente capítulo, focando o estudo em pormenores relevantes dos edifícios seleccionadas, os quais serão expostos em detalhe no capítulo seguinte. Os métodos de desenho e fabricação serão semelhantes aos apresentados neste capítulo a fim de automatizar o mais possível os processos, de forma a aumentar o contraste entre os casos de estudo e o resultado da investigação. O que se pretende com este estudo é apresentar propostas de soluções dos casos de estudo, ultrapassando as limitações encontradas aquando da sua construção.

*“Aperfeiçoando um elemento arquitectónico tido como adquirido (parede) através da posição espacial dos seus elementos (tijolo) cria-se um novo componente arquitectónico<sup>47</sup>.”* (Bonwetsch et al., 2006: 493)

## 4.2 \_ Abordagem e processos

O presente capítulo pretende complementar a dissertação através duma componente prática que tem como objectivo mostrar o possível encontro das tecnologias de fabricação digital e robótica com obras onde a utilização desses métodos não foi

---

<sup>46</sup> Tradução de “Since brick construction is based on the repetitive assembly of numerous small and identical physical units, it presents a strong potential to be automated”

<sup>47</sup> Tradução de “In informing an established element of architecture (i.e. the brick wall), through the definition of the spatial dispositions of its single members (i.e. the brick), a novel architectural component emerged”



possível. A fim de compreender mais acerca da fabricação do tijolo, foi realizada uma visita à fábrica da Cerâmica do Vale da Gândara pelo autor, juntamente com o DFL, onde foi possível acompanhar toda a produção deste material. Foi possível assistir aos diferentes processos de cura e testes de qualidade efectuados ao tijolo antes de este ser comercializado. A selecção dos objectos de estudo foi baseada no seu potencial formal e na capacidade de personalização quando aplicado a formas mais complexas. Seguindo uma estrutura de análise semelhante para todos os casos, primeiramente será feita uma análise arquitectónica e construtiva a fim de perceber o método de construção aplicado. De seguida é realizada uma análise digital utilizando os *softwares* Rhinoceros (Rhino) e Grasshopper. Nesta análise serão testadas diferentes geometrias baseadas e inspiradas nos conceitos arquitectónicos usados por Hestnes Ferreira bem como noutros elementos arquitectónicos que se entenderem pertinentes.

Inicialmente os casos de estudo são modelados no Rhino. Visto tratar-se de uma reprodução fiel do que está construído, a utilização de um programa de CAD convencional<sup>48</sup> seria o suficiente para perceber o funcionamento construtivo e modular do caso de estudo pois não serão necessárias alterações formais.

Após a modelação e a compreensão do sistema construtivo, passa-se para a construção de uma definição em Grasshopper<sup>49</sup> que traduza o comportamento dos tijolos aplicados a uma ou várias superfícies. Inicialmente essa superfície é semelhante à encontrada no caso de estudo de forma a facilitar a visualização enquanto se constrói a definição. As definições têm como base a unidade de construção, ou seja o tijolo. Cada tijolo é um objecto independente, podendo ter um comportamento diferenciado dos restantes. A geometria gerada no Grasshopper será exportada



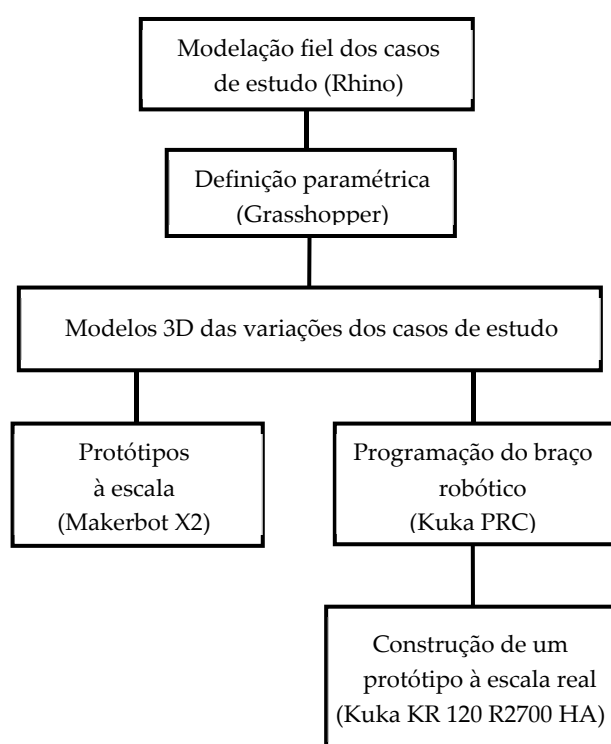
▲ Fig. 58 \_ fábrica Cerâmica Vale da Gândara de cima para baixo transporte da matéria prima para a trituradora, corte do tijolo.

<sup>48</sup> O Rhino não se trata de um *software* convencional de CAD, pois tem a capacidade de produzir NURBS.

<sup>49</sup> Definição é o conjunto de operações realizadas pelo *software* que são aplicadas aos objectos definidos.

para o Rhino para a realização de modelos a escala reduzida em ABS, de cada caso de estudo, recorrendo a uma impressora 3D, de alguns modelos tendo em conta a sua qualidade e variação formal e construtiva. Os protótipos impressos em 3D servirão de base de escolha para a realização de um protótipo à escala real com o auxílio de um braço robótico. [Fig. 59] Pode-se conferir todos os modelos impressos e as suas características no anexo E da presente dissertação, bem como todas as definições de Grasshopper criadas em todos os casos apresentados ao longo deste trabalho prático no anexo D.

► Fig. 59 \_ diagrama das etapas dos processos práticos desde a modulação à fabricação.

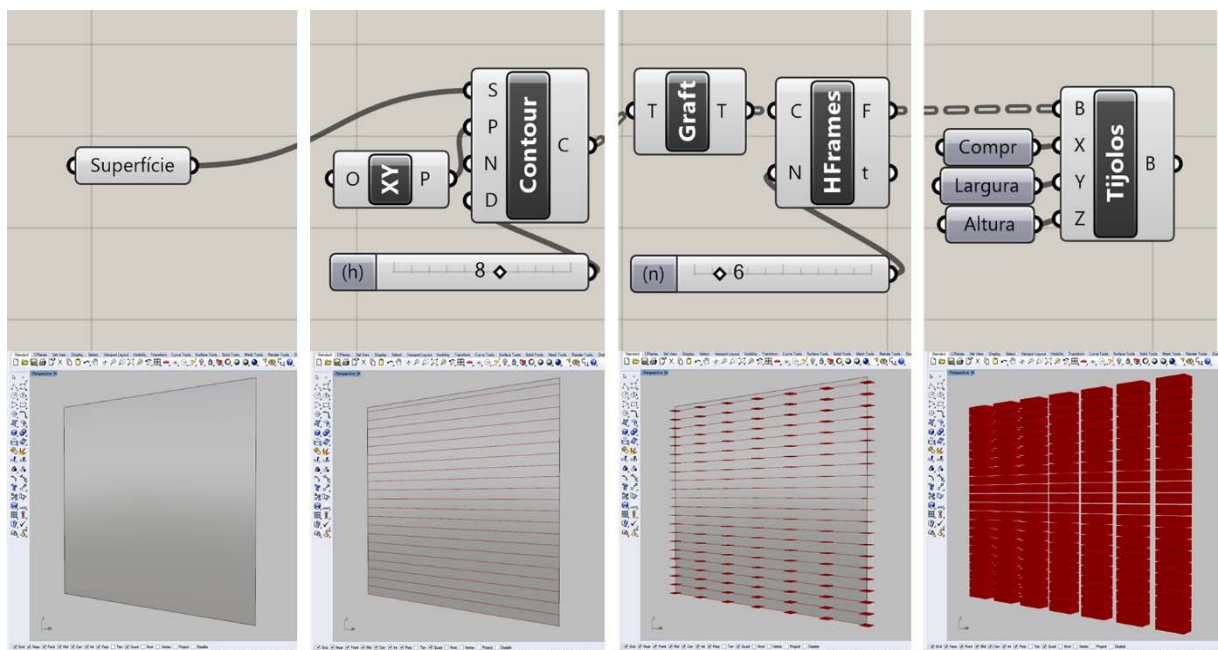


Na definição geral, que serve de base à definição de todos os casos de estudo, o único *input* que provém de fonte externa ao Grasshopper é a superfície que controla o comportamento dos tijolos. [Fig. 60a] Dada essa superfície, é feito um *Contour*<sup>50</sup> paralelo ao plano *xy* com o espaçamento *h* correspondente à altura do tijolo. [Fig. 60b] Esse espaçamento pode ser alterado na necessidade de se acrescentar argamassa entre tijolos ou para a utilização de outro tipo de tijolo ou bloco, sendo controlado de

<sup>50</sup> Conjunto de secções com espaçamento igual.

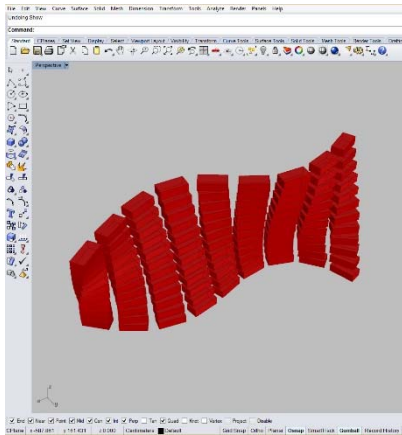
forma intuitiva por um *Slider*<sup>51</sup>. Neste ponto tem-se a intersecção entre planos horizontais espaçados  $h$  e a geometria geradora. Através do comando *Horizontal Frames* consegue-se dividir essas linhas em  $n$  partes criando um plano entre partes<sup>52</sup>. [Fig. 60c] A vantagem deste comando em relação ao *Divide* é que o primeiro cria planos tangentes à *curve* dividida enquanto que o segundo cria planos por defeito com a orientação do plano mestre. Os planos tangentes definirão, também, a tangência dos tijolos ao longo da superfície. A última etapa da definição base é a criação dos tijolos que serão gerados a partir do seu centro geométrico. A partir do comando *Box*, dado um plano base e as dimensões (neste caso metade das dimensões pretendidas pois é a distância do centro do bloco ao limite exterior), criam-se blocos com as dimensões dos tijolos [Fig. 60d], com centro na origem dos planos criados pelo *Horizontal Frames* e direcção destes. Neste ponto tem-se uma superfície com  $n$  blocos, por camada, com as dimensões desejadas. A parametrização efectuada ditará o comportamento do tijolo tendo em conta a geometria geradora e como este se vai posicionando ao longo dessas superfícies.

▼ Fig. 60 \_ definição geral (em cima), resultado da definição (em baixo) da esquerda para a direita 60a, 60b, 60c, 60d.



<sup>51</sup> Régua que define um valor de input.

<sup>52</sup> É usada a opção *Graft*, pois assim o Grasshopper assume cada linha do *contour* como um elemento independente associando  $n$  a cada linha e não ao conjunto de todas as linhas do *contour*.



▲ Fig. 61 \_ exemplo da aplicação da definição numa superfície complexa.

Após a definição estar concluída, esta será aplicada em superfícies mais complexas para comprovar o seu funcionamento quando aplicada a diferentes geometrias. [Fig.61] Como os tijolos são elementos relativamente grandes para os modelos produzidos, isso faz com que as superfícies tenham pouca definição, o que resulta em tijolos em posições ou impossíveis de se suportarem, ou que prejudicam a leitura das superfícies. Por esta razão, quando necessário, após a exportação do modelo “final” do Grasshopper para o Rhino será feito um ajuste dos tijolos (se necessário) manualmente a fim de tornar o modelo coerente com a geometria geradora e/ou exequível.

Abaixo é apresentado um quadro síntese [Fig. 62] dos tipos de variações e intensões formais para a realização dos modelos no decorrer deste trabalho. O objectivo é ir complexificando a forma para testar e descobrir os limites do material.

▼ Fig. 62 \_ quadro síntese dos desafios e intensões formais dos modelos.

Caso de estudo	Forma Convencional	Raúl Hestnes Ferreira	Variação 1 (variação do módulo)	Variação 2 (rotação do módulo)	Variação 3 (variação + rotação)
Cunhal					
Pilar					
Abóbada					

## 4.3 \_ Exploração digital de construções em tijolo

### 4.3.1 \_ Cunhal | Biblioteca Municipal da Moita

A forma convencional da resolução dos cunhais permite que estes terminem em duas superfícies planas, pois o facto de os tijolos serem alternados de camada para camada faz com que no cunhal o topo do tijolo faça a viragem de superfície. No entanto, na biblioteca da Moita, o tratamento dos cunhais exteriores é feito a partir do desfaseamento das camadas dos pilares. Em cada camada os tijolos avançam meio tijolo, o que faz com que no cunhal haja uma saliência para lá da mudança de superfície [Fig. 63]. Isso, aliado ao facto dos tijolos serem assentes alternadamente, cria um “pente” de meio tijolo na intersecção das duas superfícies. Este detalhe é aplicável a qualquer ângulo de cunhal, sendo que na própria obra é visível também em “cunhais côncavos”. [Fig. 64]

A análise dos pormenores da biblioteca da Moita foi feita com recurso a desenhos cedidos pelo Arq. Hestnes Ferreira e estão disponíveis no anexo C da presente dissertação, bem como a partir do contacto directo com a obra. O método construtivo da solução apresentada passa por, no cunhal de uma parede comum de tijolo, substituir o último tijolo de cada camada, que seria assente de leito, por um de topo, aumentando assim cada fileira em meio tijolo (a quantidade saliente). Isso faz com que, alternadamente, hajam três topos de tijolo<sup>53</sup> visíveis em ambas as superfícies do cunhal.

Nos “cunhais côncavos” o método construtivo é o semelhante porém o efeito resultante não é de “pente” mas de “trança”. Essas paredes intersectam-se contudo os espaço formado entre tijolos dão-lhe um carácter “solto” e independente.



▲ Fig. 63 \_ pormenor do cunhal da Biblioteca Municipal da Moita.



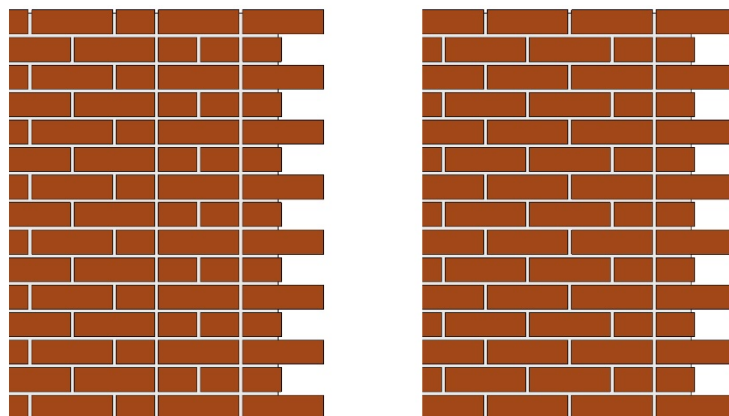
▲ Fig. 64 \_ pormenor do cunhal da Biblioteca Municipal da Moita.

---

<sup>53</sup> Dois na superfície da parede substituindo o tijolo de leito mais o topo do tijolo saliente.

No início do estudo deste projecto, modulou-se o cunhal existente na Biblioteca da Moita de forma a perceber a sua construção e a relação entre tijolos que permite a plasticidade dada ao caso de estudo. Durante essa modulação percebeu-se que o pormenor poderia ser resolvido de diferentes formas para atingir o mesmo resultado. [Fig. 65]

► **Fig. 65** \_ duas variações de resolver o cunhal em “pente”. Solução de Raúl Hestnes Ferreira (à esquerda), solução do autor (à direita).



Como foi referido no subcapítulo anterior, o método de geração dos tijolos foi parametrizado no Grasshopper. Tomando como ponto de partida a definição base (ver 3.1), alterou-se e optimizou-se a mesma para ser aplicada em cunhais. As paredes que compõem o cunhal partilham a mesma definição mas com algumas diferenças em alguns valores, no entanto, os comandos são os mesmos. O *input* também sofre alterações, podendo ser o contorno do cunhal ou a superfície que define o cunhal.

Desta forma, alterou-se o *input* para *Surface* ou *Curve*<sup>54</sup>, permitindo uma superfície ou uma linha de contorno. Como visto na Fig. 60 e Fig. 61, quando aplicada a definição a uma superfície simples são criadas torres de tijolos empilhados. Para criar o desfasamento típico do assentamento dos tijolos, aplica-se o comando *Cull Pattern*<sup>55</sup> onde se define um padrão *True/False* em, que quando *False*, a geometria é eliminada e assim um em

<sup>54</sup> *Curve* é a denominação que o *software* utilizado, Rhino, utiliza para definir qualquer tipo de linha, seja ela recta ou curva.

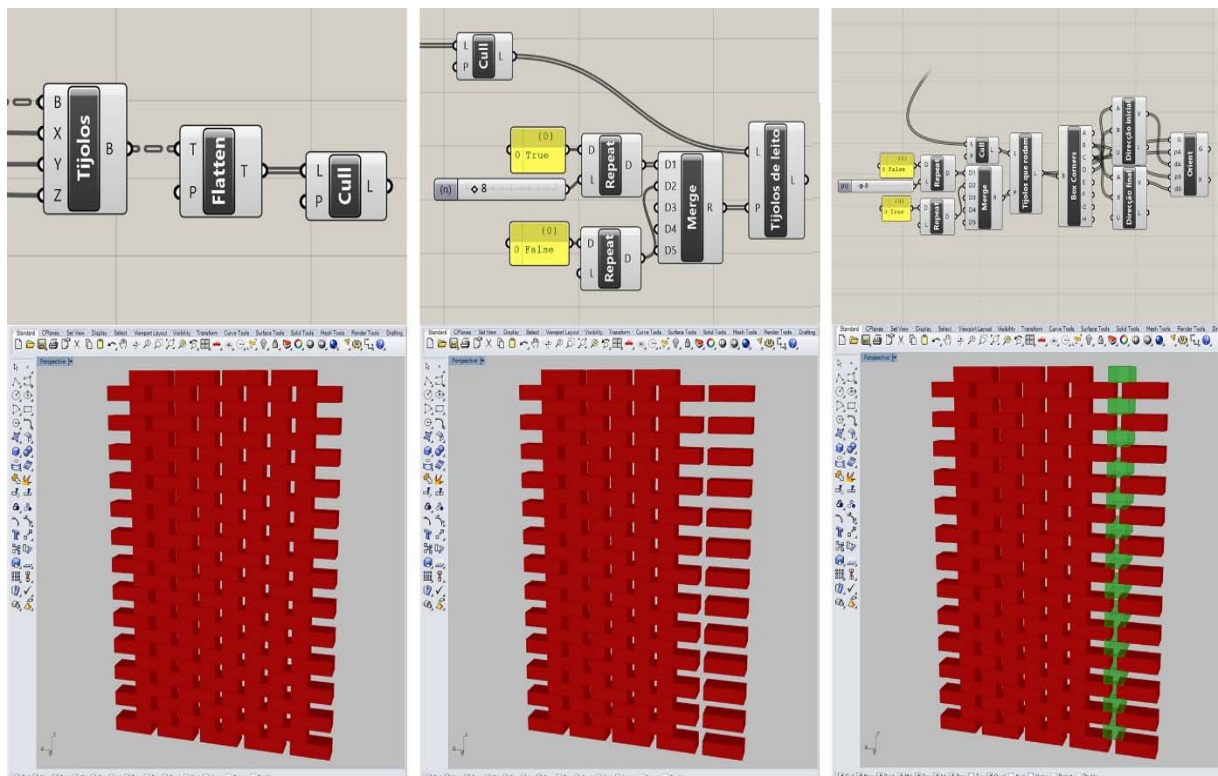
<sup>55</sup> É usado o comando *Flatten* entre os tijolos e o *Cull Pattern* para o Grasshopper assumir todos os tijolos e não agrupados por camada. O *Flatten* actua como inverso do *Graft*.



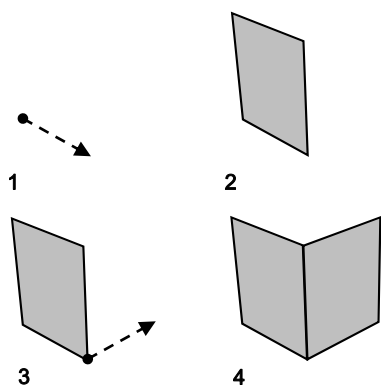
cada dois tijolos são eliminados, tornando-os alternados. [Fig. 66a] Para introduzir automaticamente os tijolos de topo no cunhal, realizaram-se mais algumas alterações à definição, compostas por duas partes. Uma das partes define todos os tijolos de leito e a outra os tijolos de topo. Para tal fez-se um *Cull Pattern* com um padrão que depende do número de tijolos por fila. Assim, sempre que se altere o número de tijolos o padrão é alterado simultaneamente. Para criar o padrão usou-se o comando *Merge*, que permite juntar dados, e com o comando *Repeat* introduziu-se o número de vezes (número de tijolos) em se repetiria *True*, para manter os tijolos, seguido de um *False* por cada número total de tijolos. Desta forma foi possível eliminar o segundo tijolo a cada duas linhas. [Fig. 66b]

Para seleccionar apenas os tijolos que são rodados, repetiu-se o processo descrito acima trocando o *True* pelo *False*. Seguiu-se o processo de rotação, feito a partir de um *Orient*, que permite transportar uma geometria através de um ponto de referência e uma direcção iniciais até um ponto de referência e direcção finais. Essas direcções foram obtidas a partir dos vértices dos

▼ Fig. 66 \_ definição dos cunhais (em cima), resultado da definição (em baixo) da esquerda para a direita 66a, 66b, 66c.







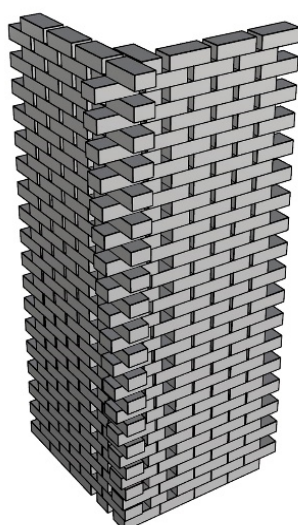
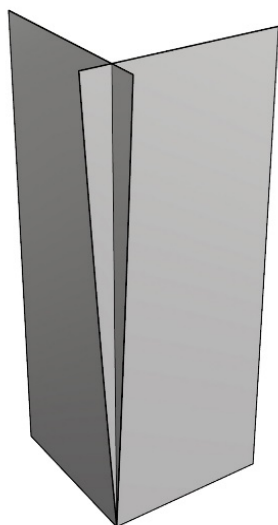
▲ Fig. 67 \_ ordem de desenho das superfícies geradoras do cunhal.

tijolos existentes com o *Box Corners* [Fig. 66c]. No fim da definição faz-se um *Join* para agrupar todos os tijolos numa única geometria. Todo este processo é repetido, invertendo a selecção dos tijolos de topo e com o ajuste inverso no *Orient*. Esta segunda definição é para a outra parede que define o cunhal. As superfícies que definem o cunhal têm de ser feitas com uma ordem específica. [Fig. 67] Desta forma os tijolos de topo ficam no cunhal. A primeira definição é para a parede desenhada em primeiro lugar e a segunda para parede concorrente; assim o cunhal é modelado sem necessitar de ajustes posteriores.

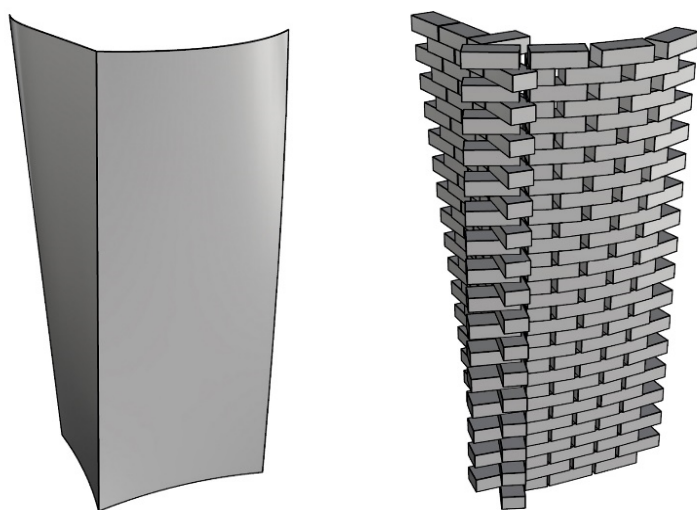
Para a criação dos modelos, optou-se por criar formas com geometria variável mas com uma regra de desenho intuitiva mas que tornasse o modelo plasticamente interessante. Neste trabalho realizaram-se três modelos com intenções diferentes e ainda duas variações, num total de cinco modelos.

1. O exemplo da Fig.68 foi uma intenção de variação que surgiu intuitivamente. O perfil do cunhal é um “gradiente” que vai desde o cunhal convencional até ao cunhal desenhado por Hestnes Ferreira. As superfícies geradoras foram criadas através de um *Trim* entre um plano vertical e o contorno pretendido das paredes que formam este cunhal.

▼ Fig. 68 \_ da esquerda para a direita, superfícies geradoras, modelo 3D modelado no Rhino, modelo impresso numa impressora 3D.



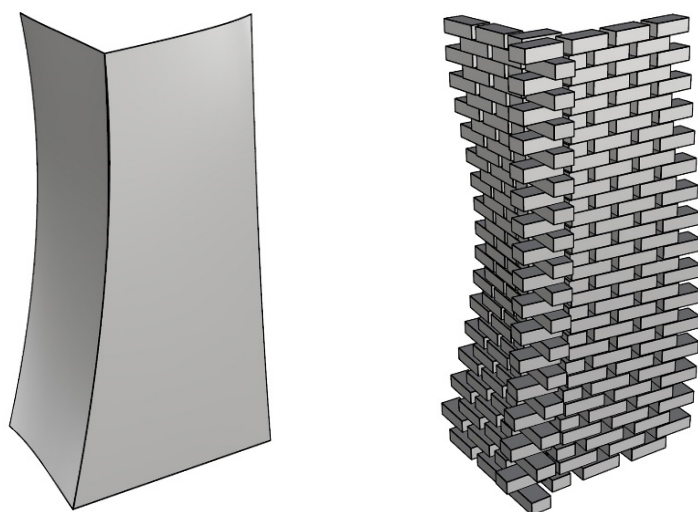
2. O modelo representado na Fig. 69 é uma tentativa de explorar formas mais livres intersectando duas superfícies irregulares, terminando no entanto num cunhal vertical. As superfícies geradoras foram criadas através de dois pares de *curves* aleatórias, em que os pontos de intersecção foram ligados por uma linha vertical. As superfícies foram geradas a partir do comando *Sweep 2 Rails* que permite criar uma superfície a partir de uma *curve* que percorra duas outras *curves*.



▼ Fig. 69 \_ da esquerda para a direita, superfícies geradoras, modelo 3D modelado no Rhino, modelo impresso numa impressora 3D.



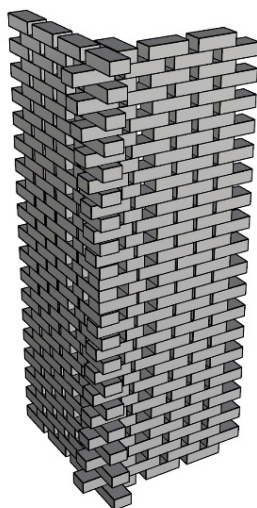
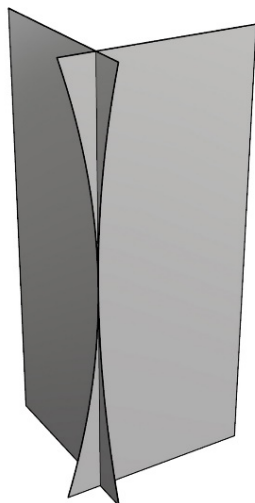
3. Este modelo é uma complexificação do modelo anterior, pois não só se criaram superfícies irregulares como a intersecção é também ela irregular. [Fig. 70] As superfícies geradoras deste modelo foram criadas a partir de dois *Loft* entre três *curves* aleatórias com rotações de 45° sucessivas.



▼ Fig. 70 \_ da esquerda para a direita, superfícies geradoras, modelo 3D modelado no Rhino, modelo impresso numa impressora 3D.

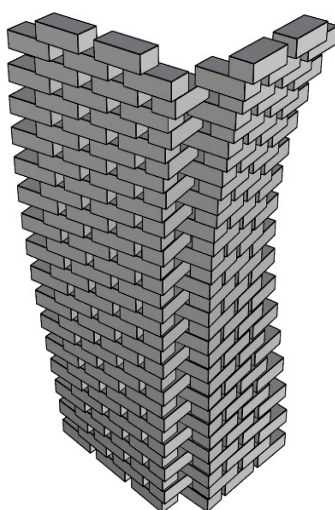
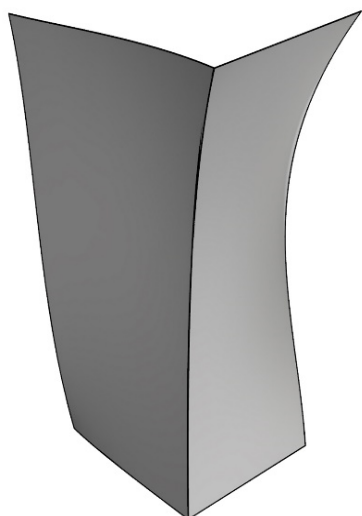


▼ Fig. 71 \_ da esquerda para a direita, superfícies geradoras, modelo 3D modelado no Rhino, modelo impresso numa impressora 3D.



4. O modelo da Fig. 71 trata-se de uma variação do exemplo 1, em que o “gradiente” vai desde o cunhal da Biblioteca da Moita até ao cunhal convencional, voltando ao primeiro. O processo de criação das superfícies foi semelhante ao processo usado no exemplo 1.

▼ Fig. 72 \_ da esquerda para a direita, superfícies geradoras, modelo 3D modelado no Rhino, modelo impresso numa impressora 3D.



5. Este modelo, apresentado na Fig. 72 surge da intersecção do resultado visual do exemplo 5 com o 3. Neste caso os tijolos não saem do plano da parede, mas sim o inverso, criando um “contra-cunhal”. Este resultado foi obtido através da eliminação dos tijolos que saem do plano da parede, num cunhal do tipo 3, deixando que os tijolos de topo desenhem o “contra-cunhal”.

### 4.3.2 \_ Pilar | Biblioteca Municipal da Moita

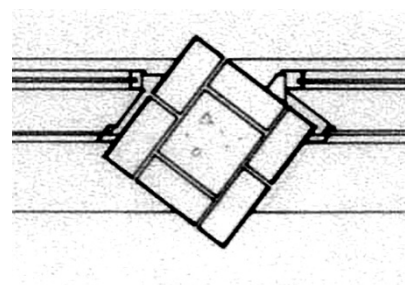
A Biblioteca da Moita é a obra de Hestnes Ferreira onde o tijolo foi explorado em mais situações distintas. Como já foi referido, a utilização do tijolo é feita de forma contínua, quer no interior quer no exterior, conferindo ao revestimento uma unidade total. No caso dos pilares, Hestnes Ferreira não se limitou a desenhar pilares convencionais de secção quadrada; [Fig. 73] e quando o fez, conseguiu introduzir dinâmica no seu desenho, tornando os pilares em elementos excepcionais. *“Nós temos um pórtico em que as colunas vão rodando. Temos pilares de secção quadrada que partem duma situação com uma determinada geometria e depois vão rodando até chegarem à mesma posição”*. (Hestnes Ferreira c.p.<sup>56</sup>, 9 de Janeiro de 2015) No caso dos pilares pontuais, Hestnes Ferreira roda alternadamente cada camada de tijolo, criando um pilar fora do comum que aparece como elemento desestabilizador da ordem das paredes planas em tijolo.

Os pilares têm um núcleo estrutural em betão e o revestimento em tijolo. Esse revestimento é composto por dois pares de tijolos juntos pelo topo, que cobrem dois lados do pilar e outro par de tijolos que fecha o revestimento. [Fig. 74] Desta forma, torna a construção do revestimento dos pilares mais rápida, e, devido à utilização modular das dimensões do tijolo, a ligação com outros elementos, como paredes, é feita de forma coerente, sem ter de recorrer a cortes do tijolo com dimensões não *standardizadas*.

Mais uma vez, iniciou-se a modulação digital a partir do desenho do elemento existente; neste caso são os pilares da biblioteca da Moita. A partir desse modelo tridimensional testaram-se algumas variações recorrendo ao módulo usado por Hestnes Ferreira. [Fig. 75] Desde o início que se notou uma limitação desse módulo na criação de geometrias mais complexas. Desse



▲ Fig. 73 \_ pilar convencional em tijolo e pilar com desenho especial.



▲ Fig. 74 \_ planta do pilar, mostrando a assemblagem do tijolo e o núcleo de betão. (pormenor na íntegra no anexo C)

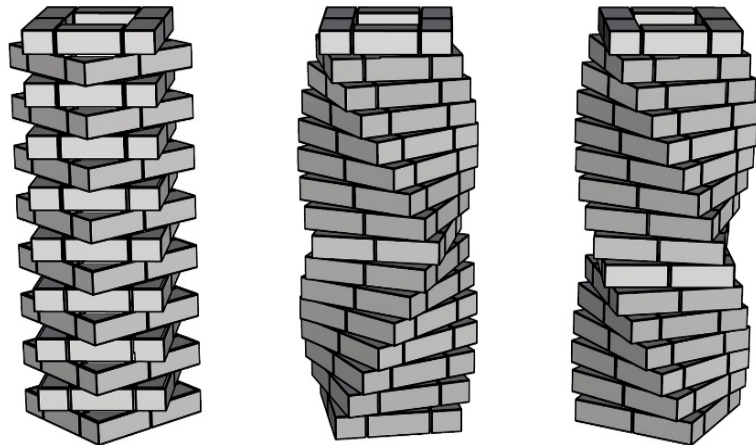
<sup>56</sup> Comunicação pessoal (ver anexo B)



modo optou-se por aumentar no número de tijolos em cada camada para aumentar a definição<sup>57</sup> da geometria resultante aumentando o espectro de variações.

Usando, novamente, o Grasshopper para parametrizar os diferentes testes, alterou-se a definição base otimizando-a para ser aplicada em pilares com superfícies complexas. A partir

► Fig. 75 \_ pilar de Hestnes Ferreira (à direita) e primeiras variações do autor (à esquerda e ao centro).

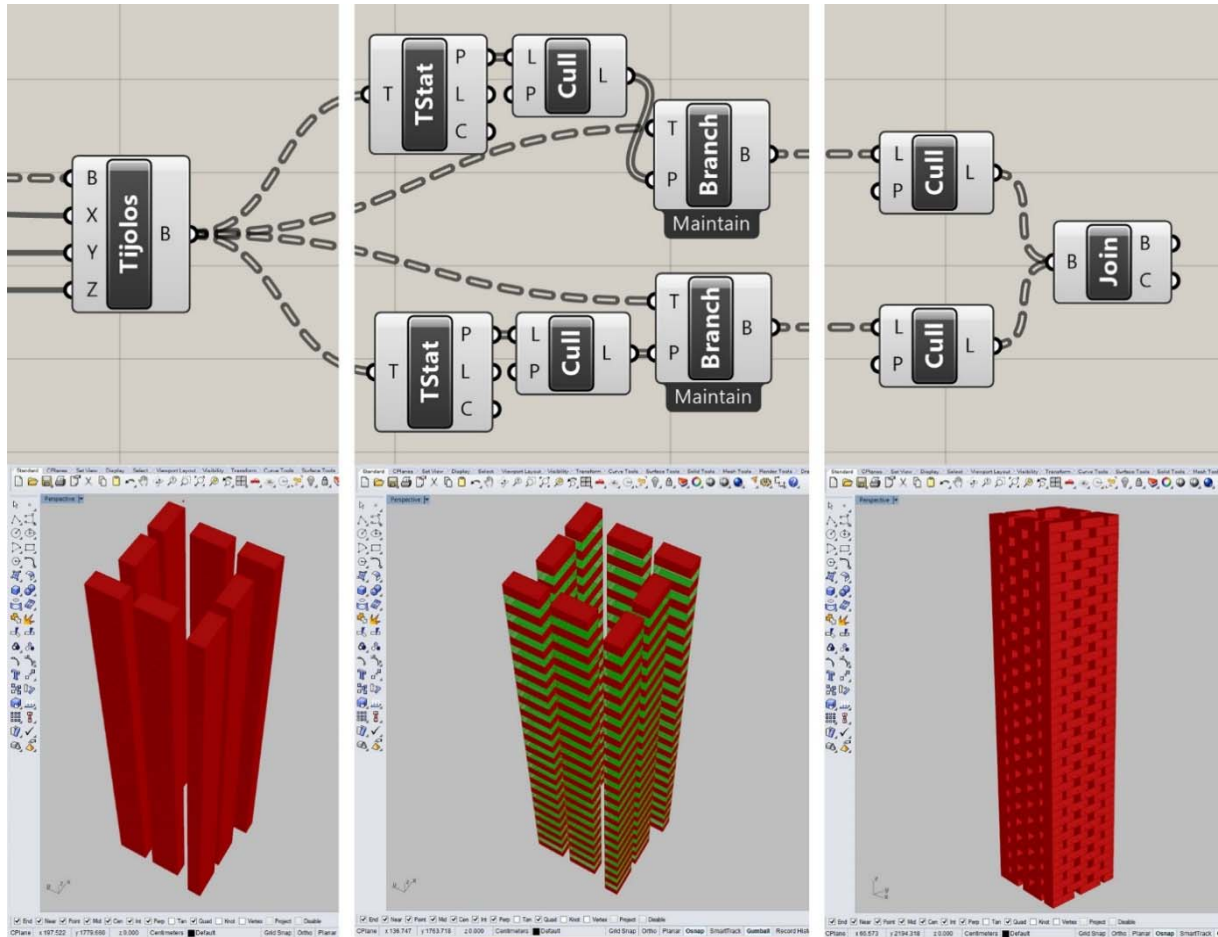


daqui, e utilizando a definição base, alterou-se o comando do *input* para uma *Brep*<sup>58</sup> de forma ao Grasshopper assumir as superfícies que compõe os pilares. Quando aplicada a definição a um pilar simples são criadas torres de tijolos empilhados. [Fig.76a] Para criar o desfasamento típico do assentamento dos tijolos tem de se extrair algumas informações da *Box* (tijolos): com o *Tree Statistics* agrupam-se os tijolos por camada, depois com o *Cull Pattern* define-se um padrão *True/False* à semelhança do usado na definição dos cunhais; isto permite-nos seleccionar as camadas ímpares ou as pares. [Fig. 76b] Depois a cada camada aplica-se um *Cull Pattern True/False* e consegue-se eliminar um em cada dois tijolos. A partir da mesma *Box* repete-se o mesmo processo mas com o padrão *False/True*; desta forma as camadas pares têm um padrão inverso às camadas ímpares. Aumentando

<sup>57</sup> Como se de um ecrã se tratasse: ao aumentar o número de pixéis, a definição da imagem aumenta também. O mesmo se aplica a este caso: quantos mais tijolos, mais fiel será a geometria criada por estes.

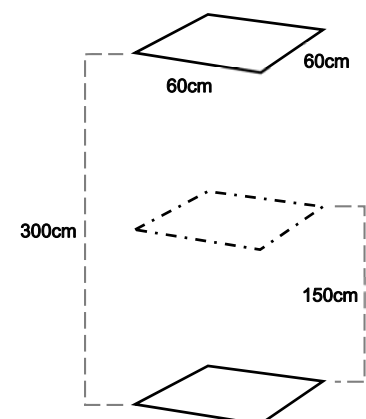
<sup>58</sup> Comando que permite ao Grasshopper assumir um conjunto de superfícies ou superfície criadas a partir de extrusões.

agora o número de tijolos desfasam-se os tijolos entre camadas. [Fig. 76c] No fim da definição fez-se um *Join* agrupando todos os tijolos numa única geometria para facilitar a sua manipulação como um objecto único.



▼ Fig. 76 \_ definição dos pilares (em cima), resultado da definição (em baixo) da esquerda para a direita 76a, 76b, 76c.

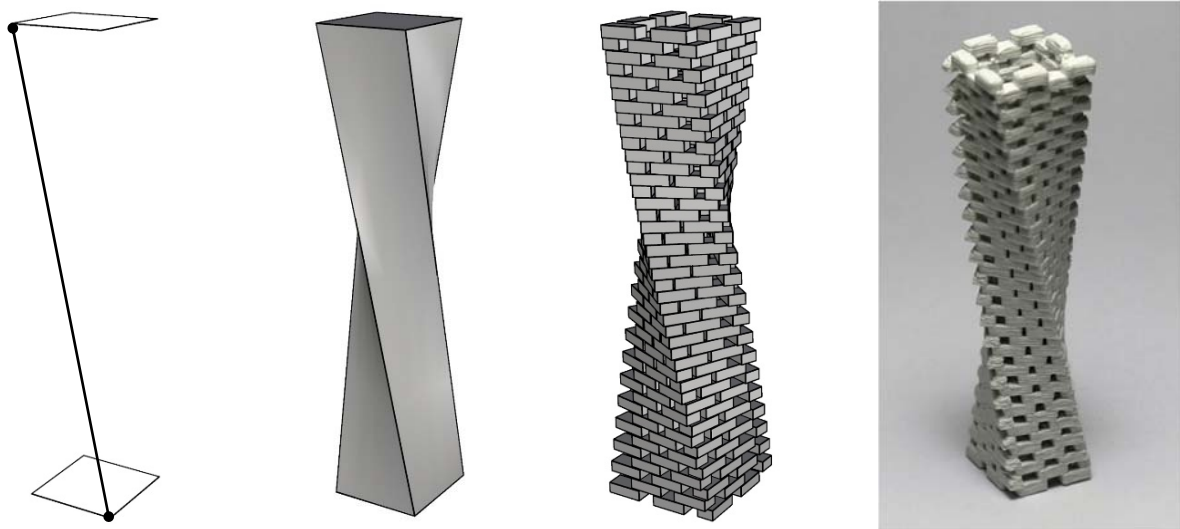
Desde logo se optou por criar geometrias complexas mas com uma regra de desenho, fácil de desenhar mas que ao mesmo tempo tornassem os modelos plasticamente interessantes. Os modelos partem de dois quadrados com 60cm de lado com uma diferença em altura de 3m (geometria base). [Fig. 77] A partir desta geometria, introduz-se variação no ponto médio da altura. Essa variação pode ser ao nível da forma, escala, posicionamento ou rotação da geometria. Neste trabalho realizaram-se três geometrias diferentes e, a partir destas, mais três variações, totalizando seis modelos.



▲ Fig. 77 \_ geometria base.

1. Este exemplo da Fig. 78 decorre da ideia imediata de variação da geometria base: a rotação de um dos quadrados. Embora não haja uma rotação real de um dos quadrados, na execução do comando Loft, que permite criar uma superfície a passar por duas ou mais *curves*, é possível definir o ponto inicial da superfície em cada uma das *curves*. Desta forma definiu-se um ponto no quadrado superior e um ponto que correspondesse a uma rotação de 90° no quadrado inferior criando uma superfície torcida.

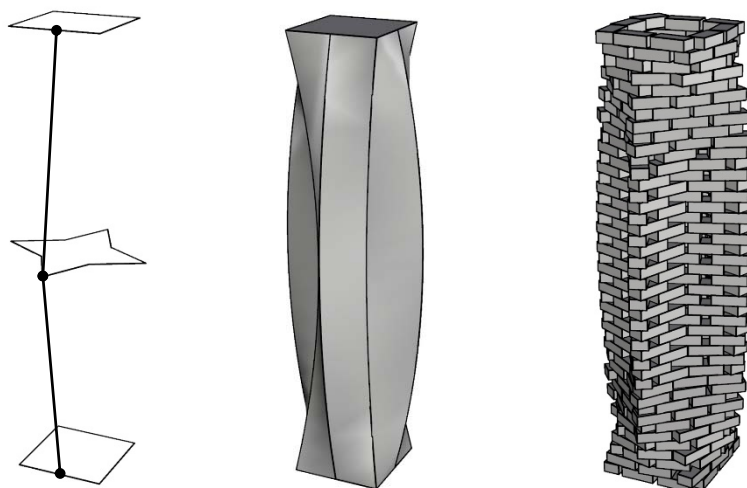
▼ Fig. 78 \_ da esquerda para a direita geometria base com pontos iniciais do Loft, superfície geradora, modelo 3D com tijolos, protótipo impresso numa impressora 3D.



2. O modelo da Fig. 80 trata-se de uma reinterpretação pessoal do pilar de Hestnes Ferreira, no qual o arquitecto faz com que as suas camadas, extrapolem alternadamente os limites virtuais de um pilar convencional. Baseado nesse pensamento criou-se um novo quadrado de 60cm de lado equidistante das extremidades do pilar. Através de uma translação dos pontos médios das arestas desse quadrado para fora do limite do pilar virtual e dos seus vértices para dentro, criou-se uma estrela de quatro pontas. Com o comando *Loft* define-se o ponto de partida em cada *curve*, sendo que nas extremidades foi um vértice, e na estrela intermédia o vértice interior correspondente. Esta estrela é



o elemento que fará com que a geometria geradora extrapole os limites virtuais do pilar convencional acrescentando dinâmica a este modelo, criando uma superfície complexa a partir de elementos simples.



▼ Fig. 79 \_ da esquerda para a direita geometria base com pontos iniciais do Loft, superfície geradora, modelo 3D com tijolos, protótipo impresso numa impressora 3D.



3. Inspirado no modelo 2, realizou-se o seu inverso: acrescentando um quadrado intermédio e movendo os pontos médios das suas arestas no sentido do núcleo do pilar. Neste modelo criou-se uma superfície côncava. Aqui os pontos iniciais do Loft foram, mais uma vez, os vértices dos quadrados da geometria base, e o vértice exterior correspondente na estrela intermédia.

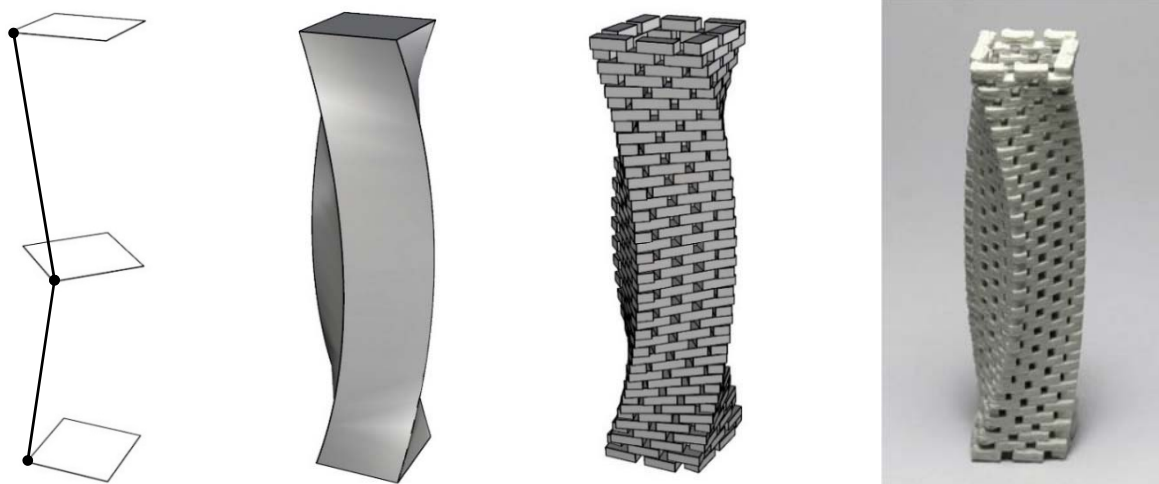


▼ Fig. 80 \_ da esquerda para a direita geometria base com pontos iniciais do Loft, superfície geradora, modelo 3D com tijolos, protótipo impresso numa impressora 3D.



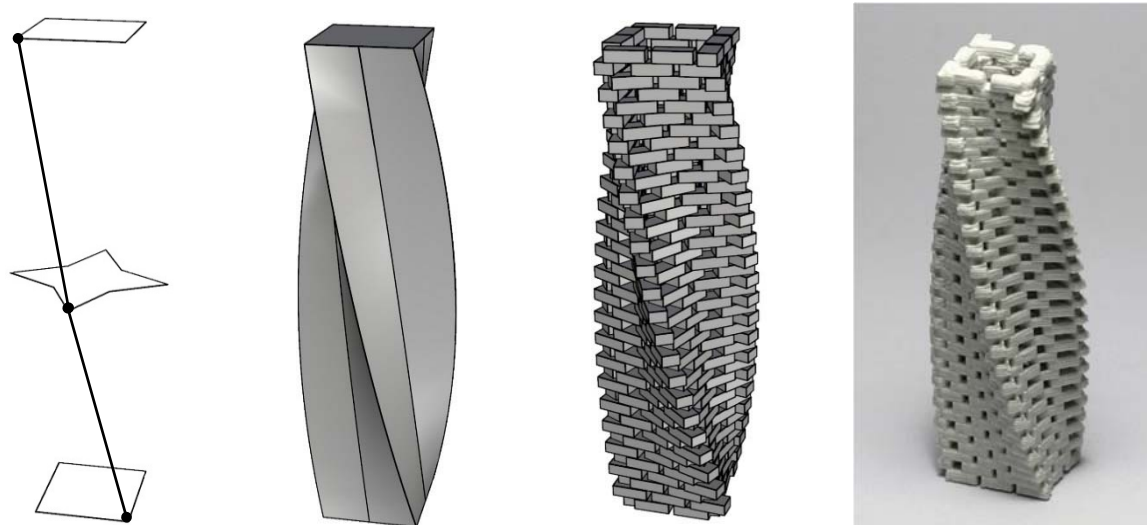
4. O exemplo da Fig. 81 trata-se de uma variação do modelo 1. A partir da ideia da torção do pilar, pensou-se em torcer

▼ Fig. 81 \_ da esquerda para a direita geometria base com geometria de variação e pontos iniciais do Loft, superfície geradora, modelo 3D com tijolos, protótipo impresso numa impressora 3D.

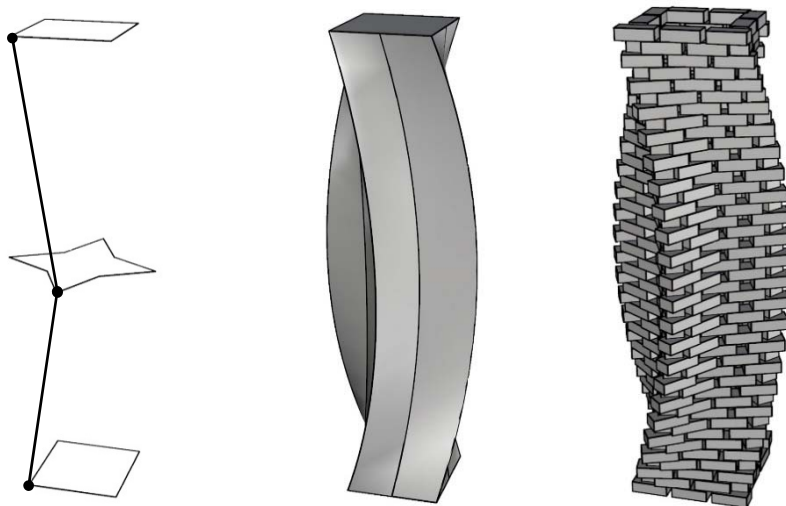


5. Mais uma vez uma variação de um modelo já feito, desta vez do modelo 2. À semelhança do modelo 1 é feita uma rotação às superfícies do pilar. Neste caso os pontos iniciais avançam em relação ao anterior, sendo que no quadrado superior é escolhido um vértice em vez do ponto médio, na estrela intermédia é escolhido um vértice exterior e no quadrado inferior é escolhido o vértice que corresponde a uma rotação de  $90^\circ$  em relação ao primeiro e  $45^\circ$  ao segundo.

▼ Fig. 82 \_ da esquerda para a direita geometria base com geometria de variação e pontos iniciais do Loft, superfície geradora, modelo 3D com tijolos, protótipo impresso numa impressora 3D.



6. Novamente uma variação do exemplo 2: no exemplo da Fig. 83 existe uma mistura do modelo 4 com o modelo 5, em que se realiza uma torção da superfície num sentido até à estrela de 4 pontas que inverte o seu sentido na segunda metade do pilar. O processo de criação foi o mesmo usado no exemplo 4, com a diferença que o ponto inicial do *Loft* na geometria intermédia é um vértice exterior da estrela.

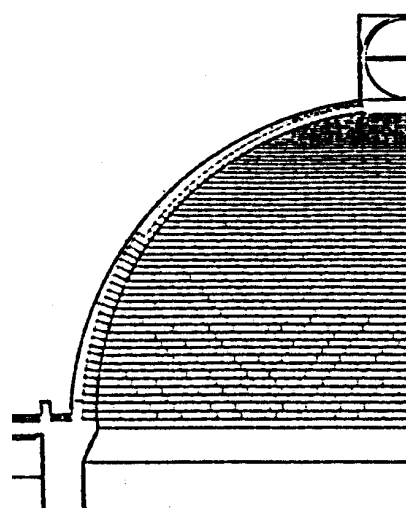


▼ Fig. 83 \_ da esquerda para a direita geometria base com geometria de variação e pontos iniciais do *Loft*, superfície geradora, modelo 3D com tijolos, protótipo impresso numa impressora 3D.



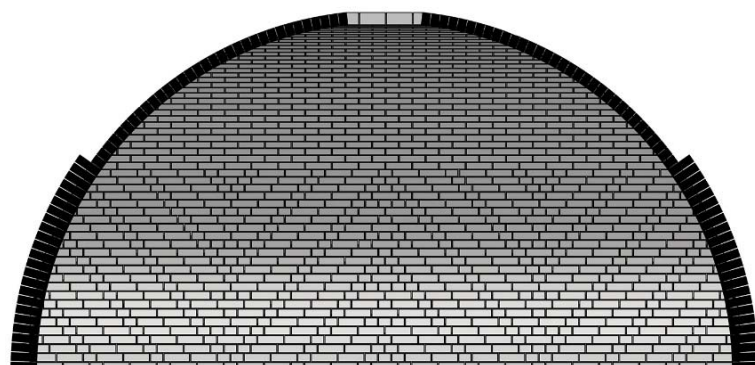
### 4.3.3 \_ Abóbada | Casa da Cultura de Beja

As abóbadas da Casa da Cultura de Beja serão o elemento abordado no presente tópico e são um exemplo de como uma dificuldade estrutural pode resultar num trabalho de desenho de alçado. Quando questionado acerca do desenho das abóbadas centrais da Casa da Cultura de Beja, Hestnes Ferreira explica que “até certo nível tinha de ter tijolos mais largos, mas a certa altura passava a ter outra posição, mais estreito, porque já não era necessário. Havia um determinado ponto onde poderia haver uma quebra e portanto eles teriam de utilizar daí para baixo tijolos mais largos e desse ponto para cima tijolos mais estreitos. [Fig. 84] Isso é uma questão tradicional, eles [os operários] já sabiam.” (Hestnes Ferreira c.p., 9 de Janeiro 2015) Foi daí que o arquitecto aproveitou para valorizar o desenho da abóbada. Visível do interior é possível ver uns “V”



▲ Fig. 84 \_ corte pelas abóbadas centrais da Casa da Cultura de Beja. (desenho na íntegra no anexo C)

▼ Fig. 85 \_ abóbadas da Casa da Cultura de Beja da esquerda para a direita vista de uma abóbada em construção, vista interior de uma abóbada central da Casa da Cultura, nervuras exteriores, secção por modelo 3D da abóbada.

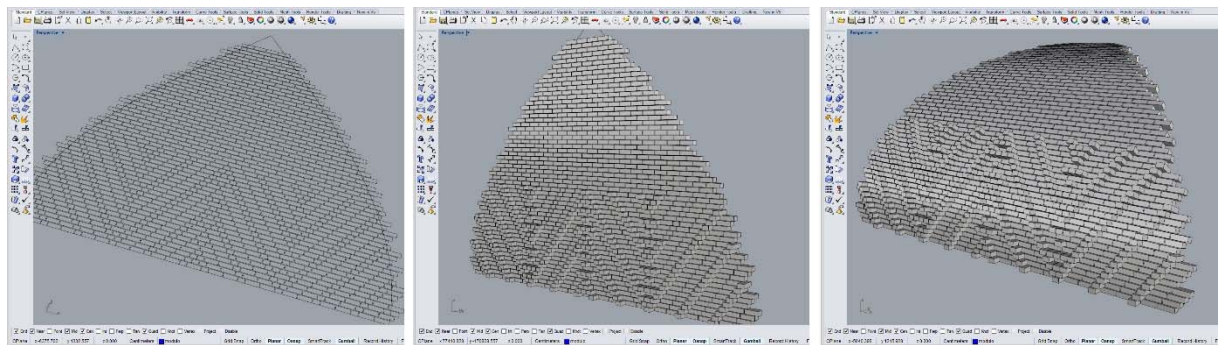


Como já foi referido, a abóbada de Hestnes Ferreira tem um desenho particular que provém de questões estruturais. A partir dessa premissa e juntando-a com a exploração formal presente neste trabalho conceberam-se algumas alternativas de abóbadas. Inicialmente, como em todos os casos de estudo, foi realizada a abóbada original. A partir do mesmo método manual criaram-se abóbadas idênticas à do arquitecto lisboeta, explorando outras alternativas formais. Depois avançou-se para alternativas formais mais complexas, parametrizando o comportamento dos tijolos recorrendo, novamente, ao Grasshopper.



No primeiro caso, o processo de modelagem iniciou-se com o desenho do alçado em verdadeira grandeza. Depois de definido o tamanho da abóbada e o desenho do alçado, este último é extrudido com as dimensões dos tijolos. A colocação dos tijolos na superfície da abóbada é feita através de um *Orient* aplicado a cada uma das fileiras do alçado. [Fig. 86] Terminado o primeiro quarto da abóbada, este é rodado e repetido mais três vezes fechando a estrutura.

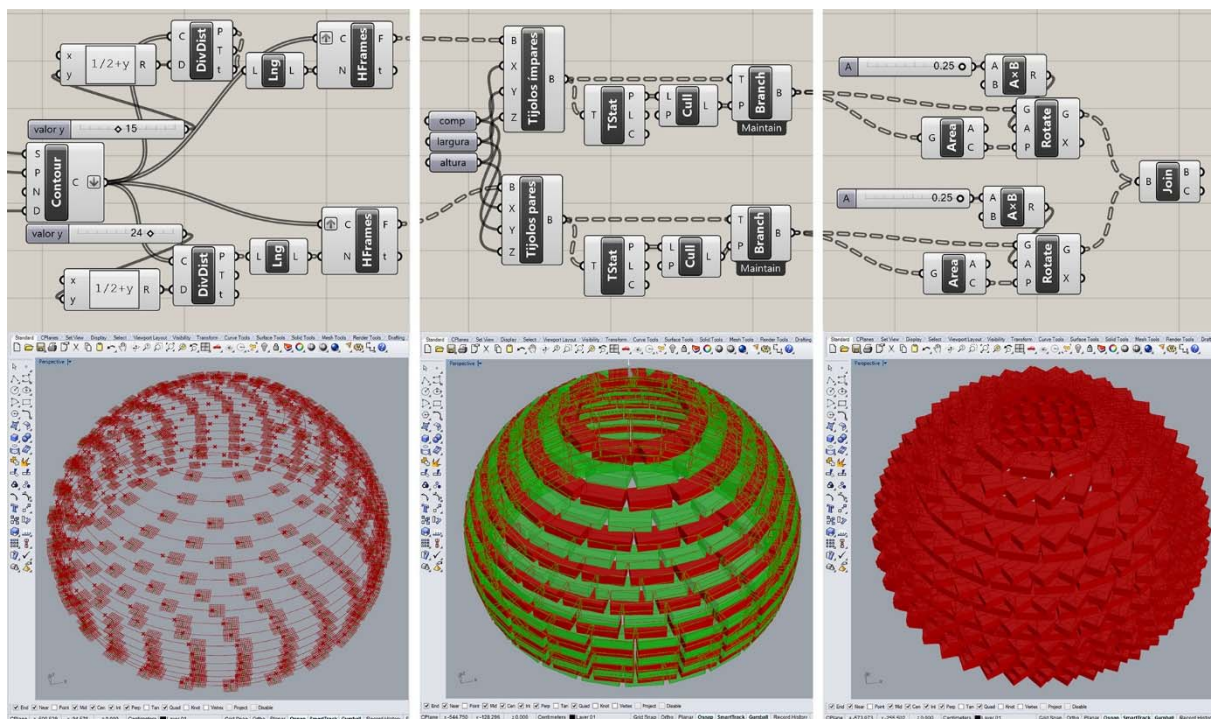
▼ Fig. 86 \_ processo manual de modulação das abóbadas em Rhino.



No caso das alternativas mais complexas, partiu-se mais uma vez da definição base em Grasshopper fazendo as alterações necessárias para esta se aplicar a abóbadas. Nos exemplos anteriores, a divisão do *Contour* foi feita com o *Horizontal Frames* e um *Slider* que definia quantas divisões existiam. Como largura da superfície das abóbadas vai variando, o processo teve de ser alterado: em vez de um número de divisões fixo, este teria de variar consoante o espaço disponível. Para tal usou-se o comando *Divide Distance* que permite dividir uma *curve* em segmentos com uma determinada dimensão. Essa dimensão é dada por uma expressão definida pelo autor que varia consoante o resultado pretendido. Este procedimento serve para se saber o número de tijolos inteiros cabem em cada nível, e com esse número introduzi-lo no *Horizontal Frames* para obtermos a quantidade de divisões uniformemente distribuídas em cada *Contour*. Para obter essa informação do *Divide Distance* usa-se o *List Length* que extrai o número de entradas que um comando tem; assim obtém-se uma lista com o número de segmentos que cada *Contour* tem. [Fig. 87a] Como será visto nos exemplos em

baixo, os tijolos serão manipulados em camadas alternadas, com comportamentos por vezes distintos. Por essa razão decidiu-se criar duas *Box*<sup>59</sup> em que uma representaria as camadas pares e outra as ímpares: assim as camadas poderiam ter variações independentes. Por esta razão pode-se omitir o desfasamento dos tijolos, pois cada camada é independente, sendo apenas necessário um *Cull Pattern* que definisse as camadas pares numa *Box* e as ímpares na outra. Esse processo foi feito à semelhança dos outros casos de estudo, através do *Tree Statistics* e do *Branch Tree*. [Fig. 87b] Por fim adicionou-se variação, que é feita pela rotação dos tijolos unindo-se a geometria com um *Join*. [Fig. 87c]

▼ Fig. 87 \_ definição da abóbada (em cima), resultado da definição (em baixo) da esquerda para a direita 87a, 87b, 87c.

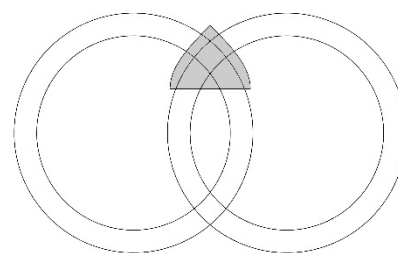


Como referido anteriormente os testes de abóbadas que se fizeram tiveram duas vertentes: uma manual e uma digital/paramétrica. No primeiro caso utilizou-se uma abóbada e uma linguagem semelhante à de Hestnes Ferreira, enquanto que no segundo caso as abóbadas são semiesféricas e a linguagem tenta extrapolar o comum. Destas duas vertentes resultaram três tipos de abordagens com duas variações em duas delas, num total de 5 modelos.

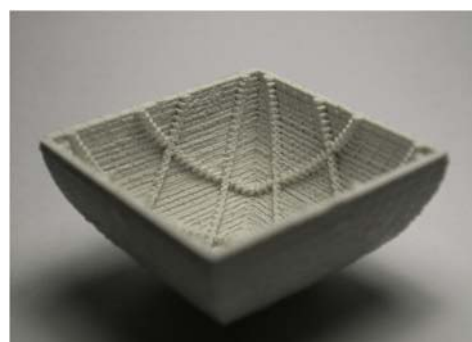
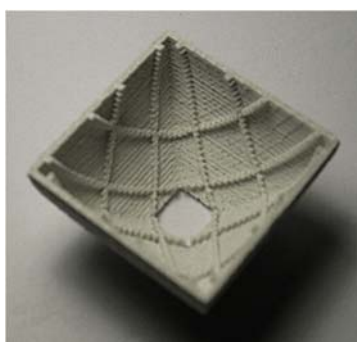
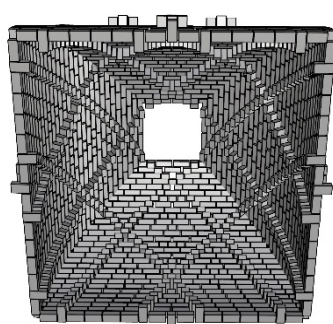
<sup>59</sup> E também dois *Divide Distance* e duas expressões.



1. O primeiro modelo, representado pela Fig. 89 surge da vontade de aproveitar a expressividade criada por Hestnes Ferreira na abóbada da Casa da Cultura de Beja. No caso do arquitecto português, este ao colocar os tijolos de topo, criando os desenhos na parte interior, deixa umas nervuras pelo exterior que mais tarde são tapadas. Nesta experiência colocaram-se os tijolos salientes pelo lado de dentro da abóbada, criando umas nervuras pelo interior fazendo um desenho que juntamente com as sombras criadas por essas nervuras dão uma outra dinâmica à abóbada. Para a realização dessa abóbada seguiram-se os passos descritos previamente, desenhando o alçado que consiste na intersecção de 2 pares de circunferências. [Fig. 88] Essas circunferências serão representadas por tijolos de topo e o restante por tijolos de leito e de topo<sup>60</sup> quando necessário, embora sem a saliência. De seguida aplica-se um *Contour* na mediatriz de uma das faces da abóbada com a altura dos tijolos. Desta forma tem-se a localização de cada fileira de tijolos. A partir dessa localização fez-se um *Orient* transportando os tijolos do alçado para a sua posição final na superfície da abóbada. Este processo é repetido para todas as fileiras e terminado o primeiro quarto de abóbada são feitas três cópias que são sucessivamente rodadas 90° fechando a abóbada.



▲ Fig. 88 \_ esquema da concepção do desenho do alçado.

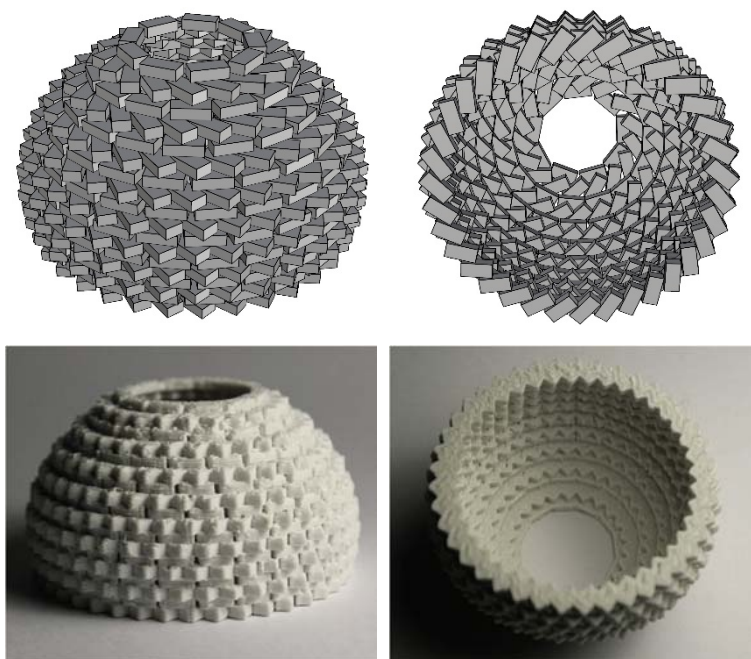


▼ Fig. 89 \_ da esquerda para a direita modelo 3D da abóbada (vista interior), protótipo impresso numa impressora 3D.

<sup>60</sup> Para preencher a abóbada sem recorrer a tijolos partidos.

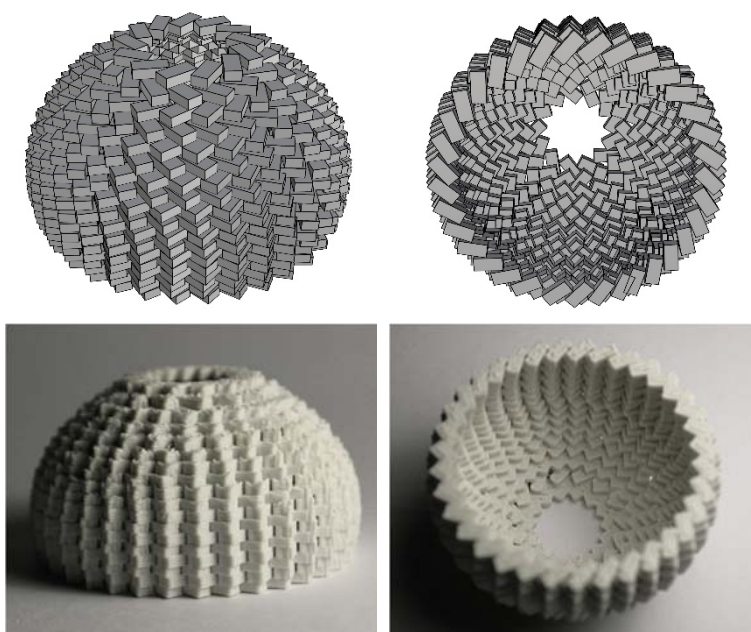
2. A abóbada da Fig. 90 foi a primeira experiência com variação. O desenho das superfícies consiste em, alternadamente, rodar fileiras de tijolos. [Fig. 90] Desta forma cria-se uma textura na superfície interior e também exterior da abóbada.

► **Fig. 90** \_ da esquerda para a direita modelo 3D da abóbada (vista exterior), modelo 3D da abóbada (vista interior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista exterior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista interior).

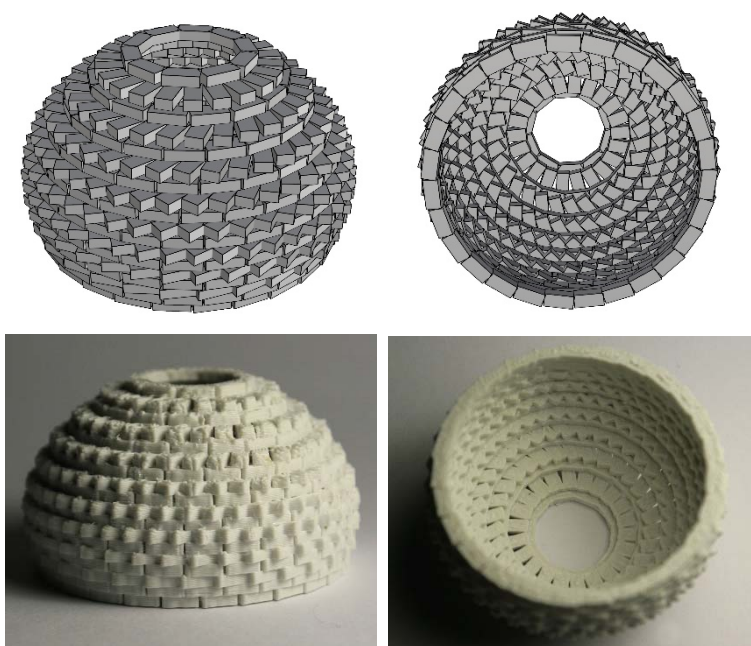


3. Aproveitando o conceito do exemplo 2, o modelo apresentado na Fig. 91 acrescenta complexidade à superfície da abóbada tendo rotação em todas as fileiras. No entanto, a rotação é oposta entre fileiras, fazendo com que os topos dos tijolos quase se encontrem como num cunhal, criando uma superfície uniforme e texturada.

► **Fig. 91** \_ da esquerda para a direita modelo 3D da abóbada (vista exterior), modelo 3D da abóbada (vista interior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista exterior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista interior).

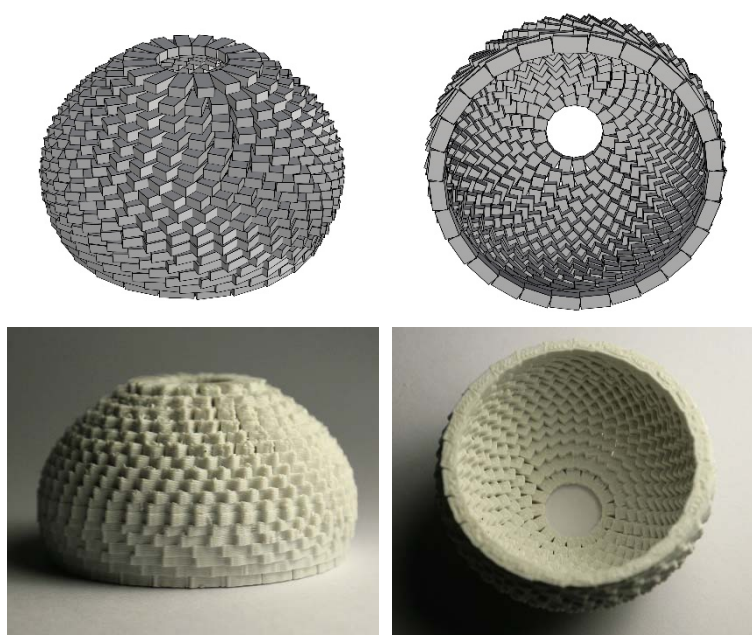


4. Este modelo apresentado na Fig. 92 trata-se de uma variação do exemplo 2. Desta vez a rotação dos tijolos não é feita uniformemente ao longo de toda a superfície mas tem uma variação gradual. Esta variação é controlada pela distância entre duas linhas: em que quanto maior é essa distância, maior é a rotação dos tijolos.



◀ Fig. 92 \_ da esquerda para a direita modelo 3D da abóbada (vista exterior), modelo 3D da abóbada (vista interior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista exterior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista interior).

5. Este último exemplo apresentado na Fig. 93 é uma mistura da variação vista no exemplo 4 e no exemplo 3. Neste modelo criou-se novamente uma variação na textura da superfície com uma variação gradual ao longo desta.



◀ Fig. 93 \_ da esquerda para a direita modelo 3D da abóbada (vista exterior), modelo 3D da abóbada (vista interior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista exterior), protótipo impresso numa impressora 3D (vista interior).

## 4.4 \_ Produção automatizada de uma estrutura em tijolo

### 4.4.1 \_ Introdução

O presente capítulo pretende expor os processos realizados até à fabricação de uma estrutura em tijolo, à escala real, totalmente automatizada. A escolha dessa estrutura contou com a apreciação do arquitecto Raúl Hestnes Ferreira.



▲ Fig. 94 \_ exemplo seleccionado para a fabricação.



▲ Fig. 95 \_ tipos de tijolos disponíveis para a construção de cima para baixo tijolo perfurado (230×110×50mm), tijolo maciço (230×110×70mm).

Em conversa com Hestnes Ferreira foram-lhe mostradas as várias hipóteses e modelos apresentadas anteriormente. Dessa conversão seleccionou-se uma estrutura para fabricação. [Fig. 94] Segundo Hestnes Ferreira essa é a peça *“mais interessante, tem uma complexidade em que o que se vê dum lado não é bem o mesmo do que se vê do outro, ou se é não parece. Esta peça é muito bonita, e muito variável, tem bastante coisa a acontecer. Vão acontecendo aqui umas curvas que levam ao posicionamento destes tijolos, acho-a simples mas complexa. Um bom trabalho!”* (c.p. 14 de Agosto de 2015) A partir deste parecer, e partilhando da mesma opinião que o arquitecto, iniciou-se o processo de optimização do desenho para a sua fabricação.

A primeira modificação que se fez teve que ver com a logística na fabricação e transporte da estrutura. Os modelos realizados anteriormente tinham cerca de 8 tijolos por fila, o que iria tornar a estrutura muito grande e pesada. Esse número de tijolos tinha a ver com a “definição” referida em 3.2.2 que seria uma mais-valia para algumas soluções; no entanto, no caso desta solução em específico, esse número poderia ser reduzido facilitando a construção e o transporte. Outra modificação necessária foi a alteração da altura dos tijolos de 7cm para 5cm. A razão que levou a essa mudança foi o facto de os tijolos de 5cm disponíveis serem perfurados, pesando menos de metade em relação aos tijolos maciços de 7cm de altura. [Fig. 95] Por este factor, mesmo contendo um maior número de tijolos (devido à sua altura menor) a estrutura será muito mais leve.

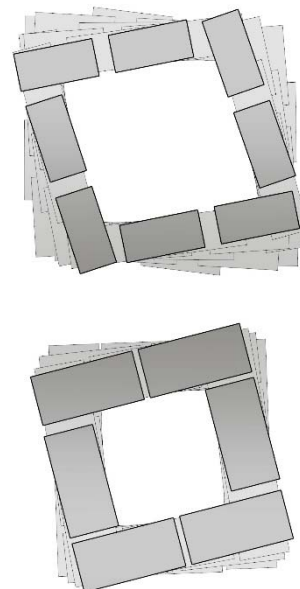


#### 4.4.2 \_ Computação e prototipagem

Durante a computação do modelo a fabricar, tratou-se de corrigir os problemas referidos antes bem como alguns erros de disposição dos tijolos no modelo.

Em relação às modificações referidas anteriormente, nomeadamente em relação à redução dos tijolos, o objectivo foi o de reduzir o número de tijolos por fileira para 6 tijolos, transformando o módulo de cada fileira no módulo usado por Hestnes Ferreira na Biblioteca Municipal da Moita. [Fig. 96] Este objectivo foi conseguido através dum processo de tentativa e erro. Após várias tentativas de tamanhos dos quadrados da geometria geradora, concluindo-se que 33cm de lado seria o tamanho ideal, permitindo 6 tijolos por fileira com um espaçamento pequeno, mas que permitisse as rotações necessárias dos tijolos sem sobreposições. A alteração da altura dos tijolos foi simples, pois já estava previsto na definição de Grasshopper (ver 3.1).

No caso dos erros de disposição dos tijolos, estes ficavam suspensos em algumas zonas das arestas do pilar. Após uma análise do comportamento dos tijolos verificou-se que duas arestas (opostas) tinham os tijolos suspensos e as outras duas não. Então decidiu-se criar os tijolos a partir de dois pares de superfícies adjacentes para depois proceder aos ajustes necessários para que todas as arestas ficassem com os tijolos completamente apoiados. [Fig. 97] Após a modelagem dos dois pares de superfícies no Grasshopper, efectua-se um *Bake*<sup>61</sup> e no Rhino moveram-se os tijolos de forma a que ficassem coincidentes na fileira central. A partir deste ponto, trabalhou-se fileira a fileira, movendo os tijolos para que desenhassam a aresta



▲ Fig. 96 \_ *de cima para baixo* modelo módulo tipo usado no protótipo, módulo tipo do modelo final optimizado.

---

<sup>61</sup> Comando que permite exportar geometria do Grasshopper para o Rhino, tornando essa geometria editável no Rhino.

do pilar conforme a geometria geradora. Isto fez com que os espaçamentos entre tijolos fossem variando ao longo do pilar. Este processo foi feito apenas em meio pilar e depois fez-se um *Mirror*. Desta forma garante-se a simetria da estrutura, o que a torna mais regular e estruturalmente mais rígida. Durante o reposicionamento dos tijolos teve-se em conta o facto de estes terem de ficar com pelo menos 2/3 em apoio, garantindo a estabilidade da estrutura.

► Fig. 97 \_ processo de modelação do pilar final da esquerda para a direita vista dos pares de superfícies que formam o pilar, pilar por corrigir depois da junção das superfícies, pilar final com o reposicionamento dos tijolos efectuado.

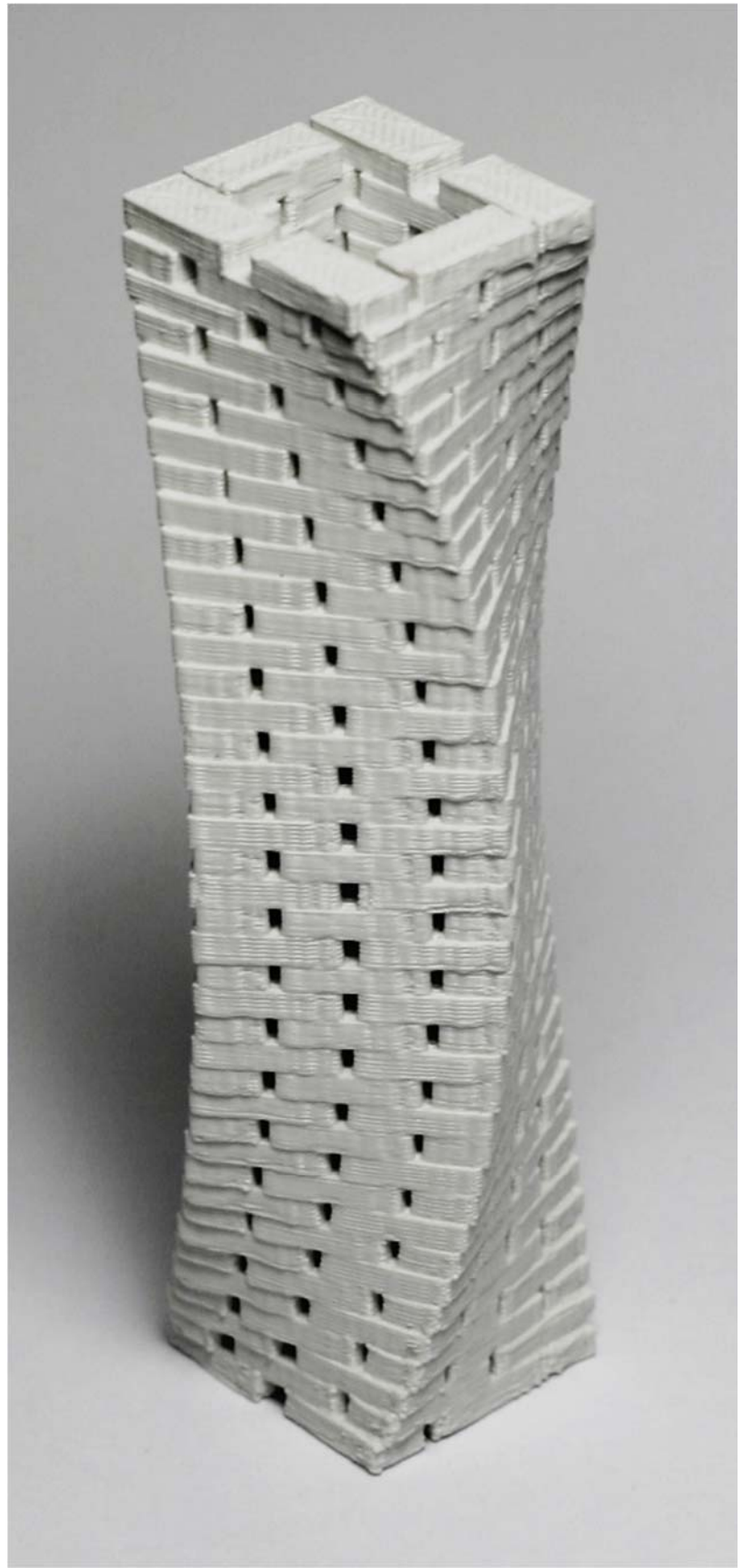
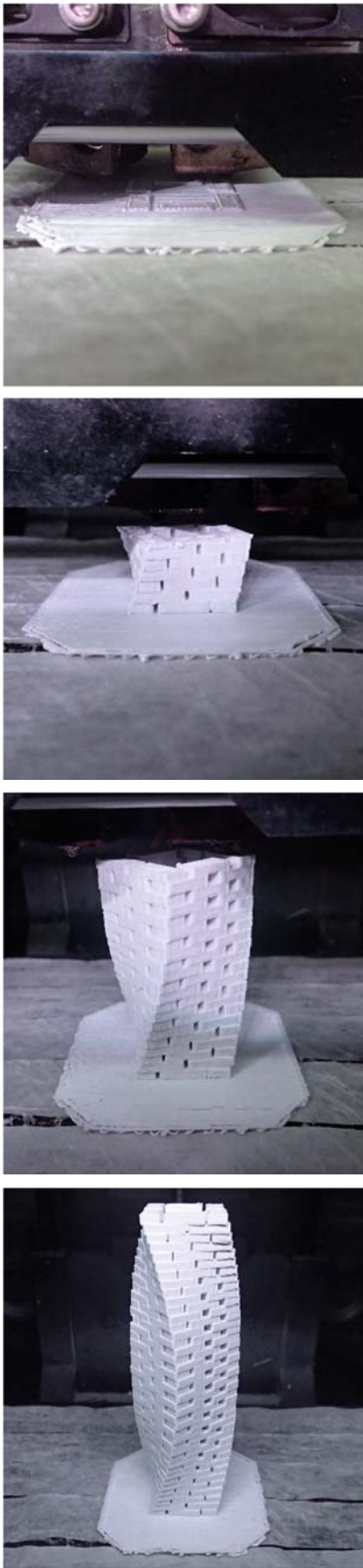


▲ Fig. 98 \_ impressora 3D Makerbot Replicator 2X.

Após a finalização do modelo digital, este foi impresso numa impressora 3D. Recorreu-se à Makerbot Replicator 2X presente do DFL. [Fig. 98] Trata-se de uma impressora que possibilita um tamanho máximo dos modelos de 24,6×15,2×15,5cm. Equipada com 2 extrusores, permite reproduzir modelos em dois materiais diferentes simultaneamente. Os 2 extrusores permitem também que se imprimam suportes para estruturas em consola com um material diferente, facilitando a remoção destes. A sua base aquecida é optimizada para a utilização de ABS.

O modelo final [Fig. 99] foi impresso a uma escala maior que os protótipos anteriores para uma melhor noção do produto final no todo e dos seus detalhes. Desta forma pôde-se avaliar com outra percepção a sua volumetria. O posicionamento dos tijolos, bem como a leitura das curvas das arestas, ficam mais detalhados e pôde-se então validar a geometria de uma outra perspectiva para além das vistas digitais produzidas no computador.





▲ Fig. 99\_ processo de impressão 3D do modelo final (à esquerda), modelo final e detalhes (à direita).

Foi também experimentada a construção do arranque do pilar. [Fig. 100] Este protótipo à escala real foi construído de forma manual, recorrendo a plantas das diferentes fileiras. Este teste serviu para se ter uma noção do tamanho real do pilar de forma a dividir-se o mesmo em várias secções. Concluiu-se que o melhor balanço entre facilidade de transporte/tempo de construção, para uma estrutura com tijolos cerâmicos, seria entre as 8 e 10 fileiras de tijolos por secção, ficando o pilar dividido em 4 ou 5 partes que seriam transportadas para o local de montagem e aí coladas formando o pilar completo. Esta experiência serviu para comprovar como é difícil e demorada a construção deste tipo de estruturas complexas manualmente. Foi sentida muita dificuldade em acertar correctamente a posição e os ângulos dos tijolos, mesmo recorrendo a plantas das diferentes fileiras.

▼ Fig. 100 \_ protótipo à escala real de uma parte do pilar sem colocação de cola. Duração: cerca de 15 minutos.



Depois da realização dos protótipos à escala reduzida e real, foram realizados alguns testes com diferentes materiais de construção a fim de perceber qual seria o melhor método para fixar os tijolos. Realizaram-se testes com argamassa e espuma PU e também com um vedante adesivo.



▲ Fig. 101 \_ teste de colagem com argamassa.

No primeiro caso [Fig. 101] concluiu-se que o processo não seria viável devido ao tempo que seria preciso para a secagem da argamassa, bem como um possível desperdício de argamassa ou a necessidade de se ter de a fazer várias vezes não ficando a mistura igual entre vezes. Outra desvantagem era o facto de a

argamassa necessitar de pelo menos 1cm de espessura, e como esta poderia não ser uniforme em toda a estrutura tal poderia prejudicar a estrutura.

A utilização da espuma PU seria um processo mais rápido, pois apenas precisa de 15 minutos para ter resistência suficiente para aguentar o peso de um tijolo maciço e numa hora fica completamente solidificada. [Fig. 102] O processo de aplicação seria rápido e directo, e o material depositado seria mais uniforme e praticamente sem espessura. No entanto, não sendo esta a função da espuma, decidiu-se procurar uma outra alternativa mais indicada para o tijolo e esse tipo de construções.

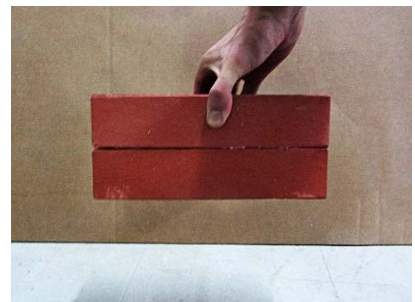
Foi a partir do contacto com o Eng.<sup>o</sup> Roberto Forte da Cerâmica do Vale da Gândara, que foi recomendado o uso de um 11vedante adesivo, usado por empresas de construção na montagem de *stands* em exposições temporárias. Este vedante permite uma colagem sem espessura, um tempo de secagem de 2 horas e tem resistência suficiente para este tipo de estruturas. É também semelhante ao produto que os arquitectos Gramazio e Kohler usam nos projectos apresentados em 2.3.2. Este vedante mostrou-se bastante eficaz na colagem dos tijolos, mesmo os perfurados<sup>62</sup>, [Fig. 103] pelo que seria o material de eleição para se usar na construção deste tipo de estrutura em tijolo.

#### 4.4.3 \_ Fabricação

Para a fabricação da estrutura em tijolo usou-se o braço robótico do DFL. Trata-se de um braço robótico Kuka KR 120 R2700 HA de 6 eixos [Fig. 104] semelhante ao usado por Gramazio e Kohler nas suas experiências. A ferramenta a usar para este trabalho poderia ser uma ventosa de vácuo ou uma garra alimentada a ar comprimido. [Fig. 104] As perfurações nos tijolos impossibilitava a utilização do vácuo pois não era criada sucção suficiente para



▲ Fig. 102 \_ teste de resistência de colagem com espuma PU.



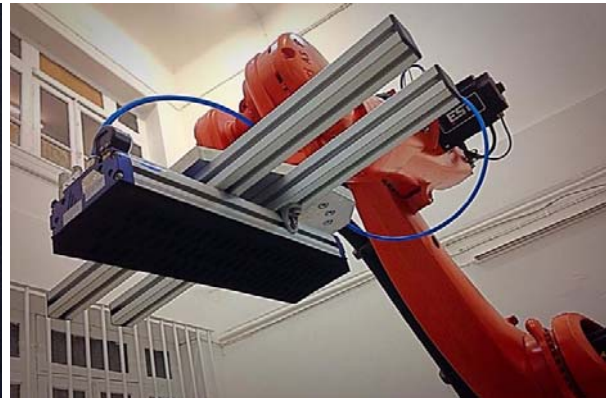
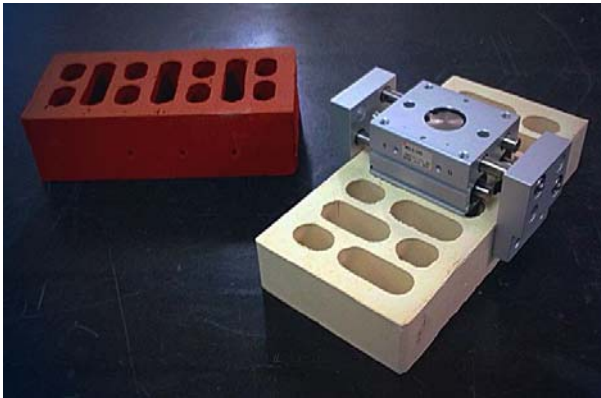
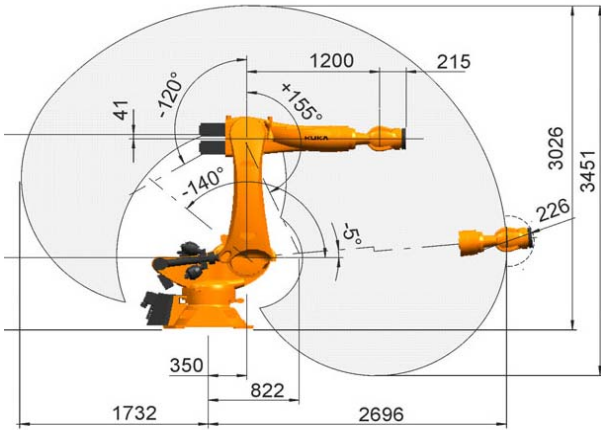
▲ Fig. 103 \_ teste de resistência de colagem com vedante adesivo em tijolos perfurados.

---

<sup>62</sup> Devido à menor superfície de contacto.



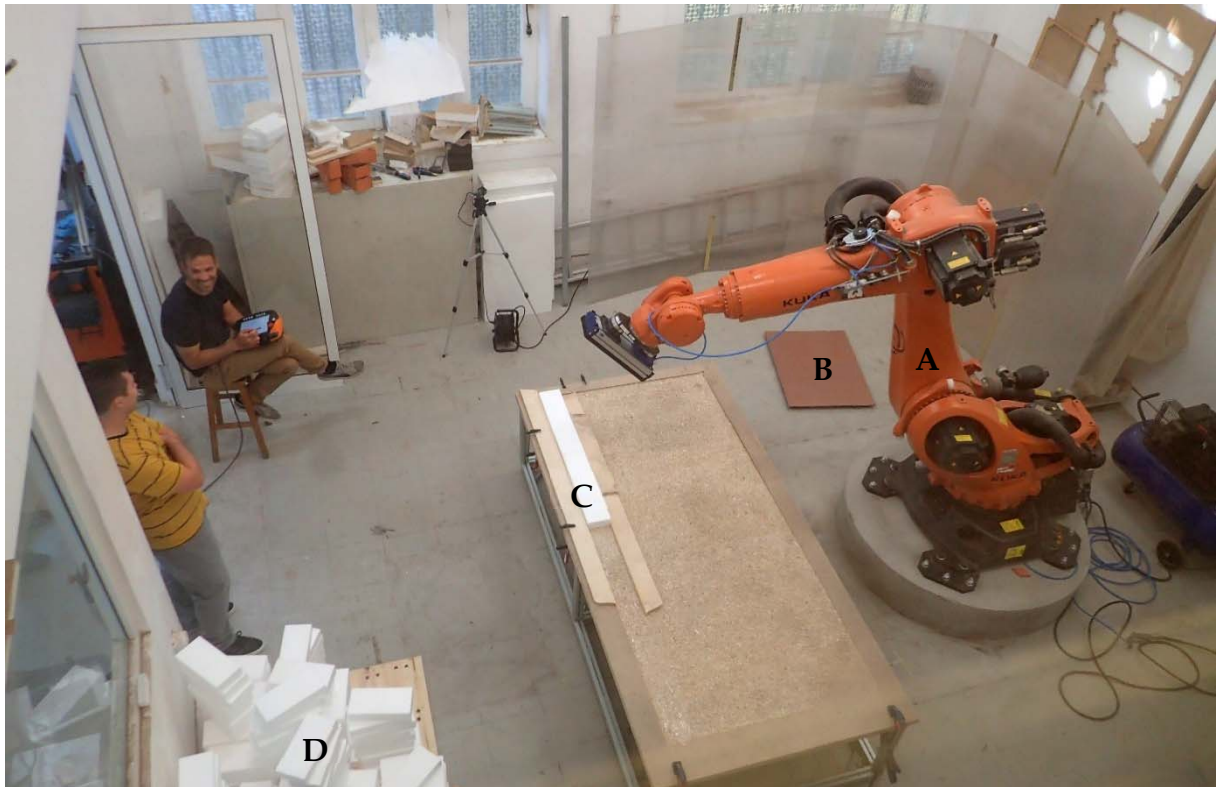
elevant os tijolos. Por essa razão a garra é a ferramenta ideal para a realização da estrutura em tijolo. O funcionamento da garra é simples: existem duas superfícies que, através da força de ar comprimido, se aproximam agarrando o tijolo.



▲ Fig. 104 \_ braço robótico da esquerda para a direita especificações técnicas de movimentos e alcance do braço robótico Kuka KR 120 R2700 HA, braço robótico DFL, garra mecânica, ferramenta de vácuo.

O modo de dispensar tijolos poderia ser automatizado de várias formas. Poder-se-ia criar uma estrutura em rampa que dispensaria os tijolos através da força da gravidade. Outra forma poderia ser criar torres de tijolos das quais o *robot* se abasteceria de tijolos. No entanto, devido ao elevado número de tijolos e ao espaço limitado este método seria pouco viável, acrescentando que se teria de programar *a priori* a localização das torres. Em relação ao primeiro método, seria necessária a construção duma estrutura que aguentasse os tijolos e ainda alimentar o dispensador manualmente. Pelo facto de o primeiro método necessitar de trabalho manual ao longo da construção e de o segundo necessitar de uma demorada preparação para evitar esse trabalho manual, optou-se por criar uma posição fixa para uma fila de tijolos em que quando o *robot* pegar no primeiro tijolo

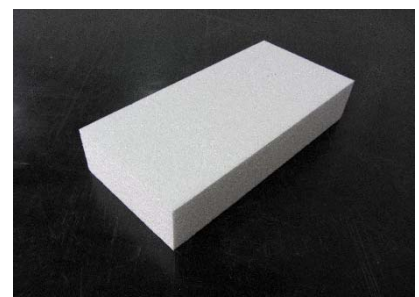
esta será empurrada repondo a posição do primeiro tijolo. Desta forma, apenas será necessária a programação de uma localização inicial (a do primeiro tijolo da fila) tornando o processo de programação mais rápido. [Fig. 105]



Devido a problemas técnicos com o equipamento do DFL, não foi possível a realização da estrutura em tijolo cerâmico. No entanto, realizou-se a mesma estrutura recorrendo a tijolos em EPS à escala real. [Fig. 106] Desta forma foi possível validar o estudo efectuado no campo da optimização do desenho e automatização da construção de estruturas em tijolo. Devido ao facto dos tijolos em EPS serem leves e opacos pôde-se usar a ferramenta de vácuo para a construção; isto não afectou em nada o processo de fabricação abordado no trabalho. Com a utilização dos tijolos em EPS pôde-se também construir toda a estrutura de uma só vez. Para a colagem dos tijolos foi usada cola de contacto própria para EPS. Este processo foi manual: a cada camada de tijolos era depositada cola no meio de cada tijolo antes que o *robot* iniciasse a camada seguinte. Com o *layout* de fabricação preparado, procedeu-se à programação e afinação do *robot*.

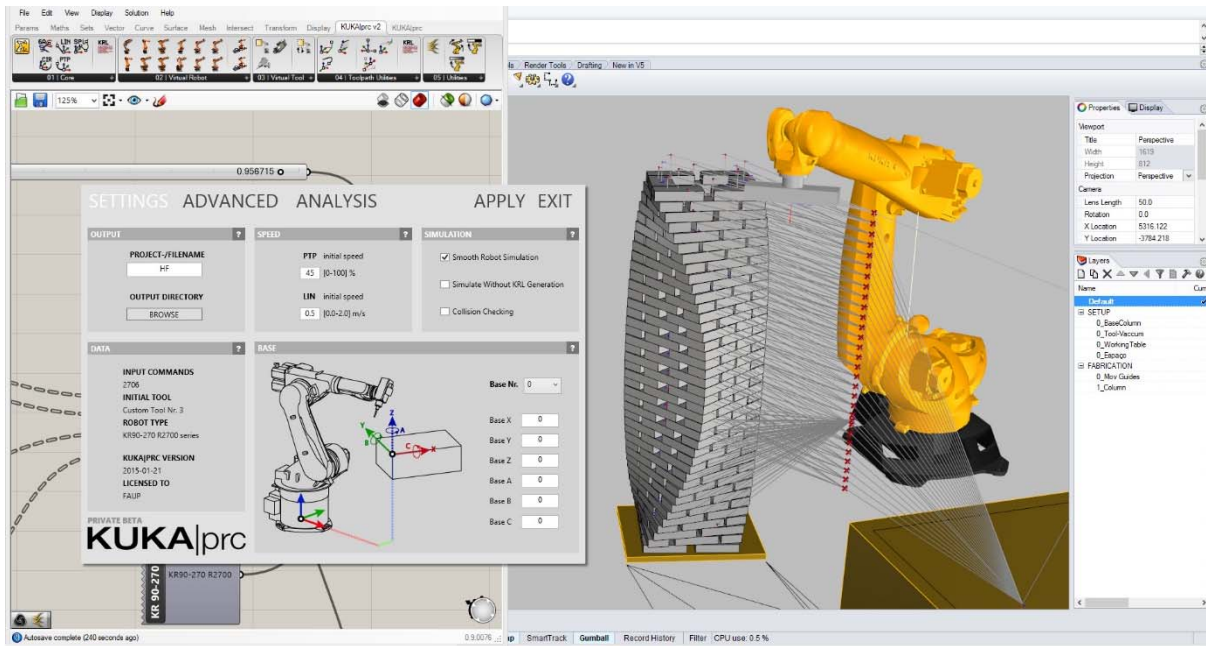
▲ Fig. 105 \_ *layout* de fabricação.

- A – Braço robótico
- B – Base de construção
- C – Dispensador de tijolos
- D – Stock de tijolos



▲ Fig. 106 \_ tijolo em EPS usado na estrutura final.

Em termos de programação, definiram-se os movimentos do *robot* que iriam permitir a construção da estrutura segundo o *layout* pré-estabelecido. Para tal usou-se o *software* Kuka PRC [Fig. 107] que permite ter a simulação de todo o processo de construção e programar na linguagem do robot. Este *software* é utilizado com *plug-in* numa definição de Grasshopper e define todos os comandos que serão efectuados pelo braço robótico.



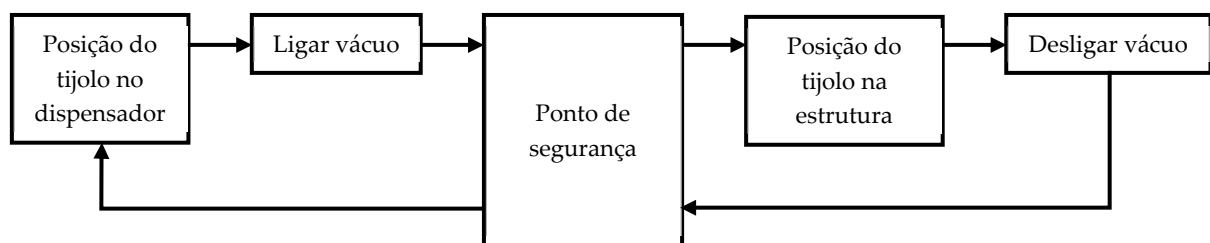
▲ Fig. 107 \_ ambiente do Kuka PRC no Grasshopper e no Rhino. É possível ver-se o percurso de cada tijolo desde o dispensador até à sua posição final.

Para que a estrutura seja feita por uma ordem determinada (neste caso de baixo para cima), os tijolos são ordenados pela sua cota z definindo a ordem de fabricação das camadas de tijolo. Com o comando *Weaver* define-se um sentido para a ordem de colocação dos tijolos em cada camada. A definição de programação do *robot* prevê um ponto de segurança, que se trata de um ponto intermédio entre o tijolo inicial e a posição final deste. Este ponto intermédio está predefinido para estar sempre 10cm acima da cota da camada do tijolo em questão, evitando assim qualquer colisão entre a ferramenta e a estrutura. Os *inputs* desta definição são a estrutura final e a geometria da ferramenta usada. Definiu-se também o modelo do *robot* usado (geometria incluída no Kuka PRC) e deste modo foi possível localizar a estrutura de tijolos para que o robot não colidisse com esta



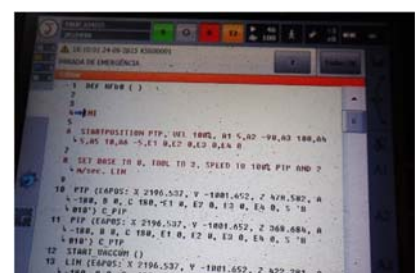
durante a construção, e garantir que todos os tijolos eram possíveis de colocar. Neste último caso teve que se ter especial atenção aos movimentos e rotações da ferramenta, garantindo que esta não colidiria com o próprio braço robótico. Os comandos usados na rotina de fabricação baseiam-se na repetição de movimentos do *robot* entre o tijolo no dispensador e a estrutura final, em que se insere um comando que liga o vácuo assim que a ferramenta toca no tijolo e o desliga assim que o *robot* pousa o tijolo na localização final. [Fig. 108] A definição usada para programar o *robot* pode ser consultada no anexo D desta dissertação.

▼ Fig. 108 \_ diagrama da rotina de fabricação.

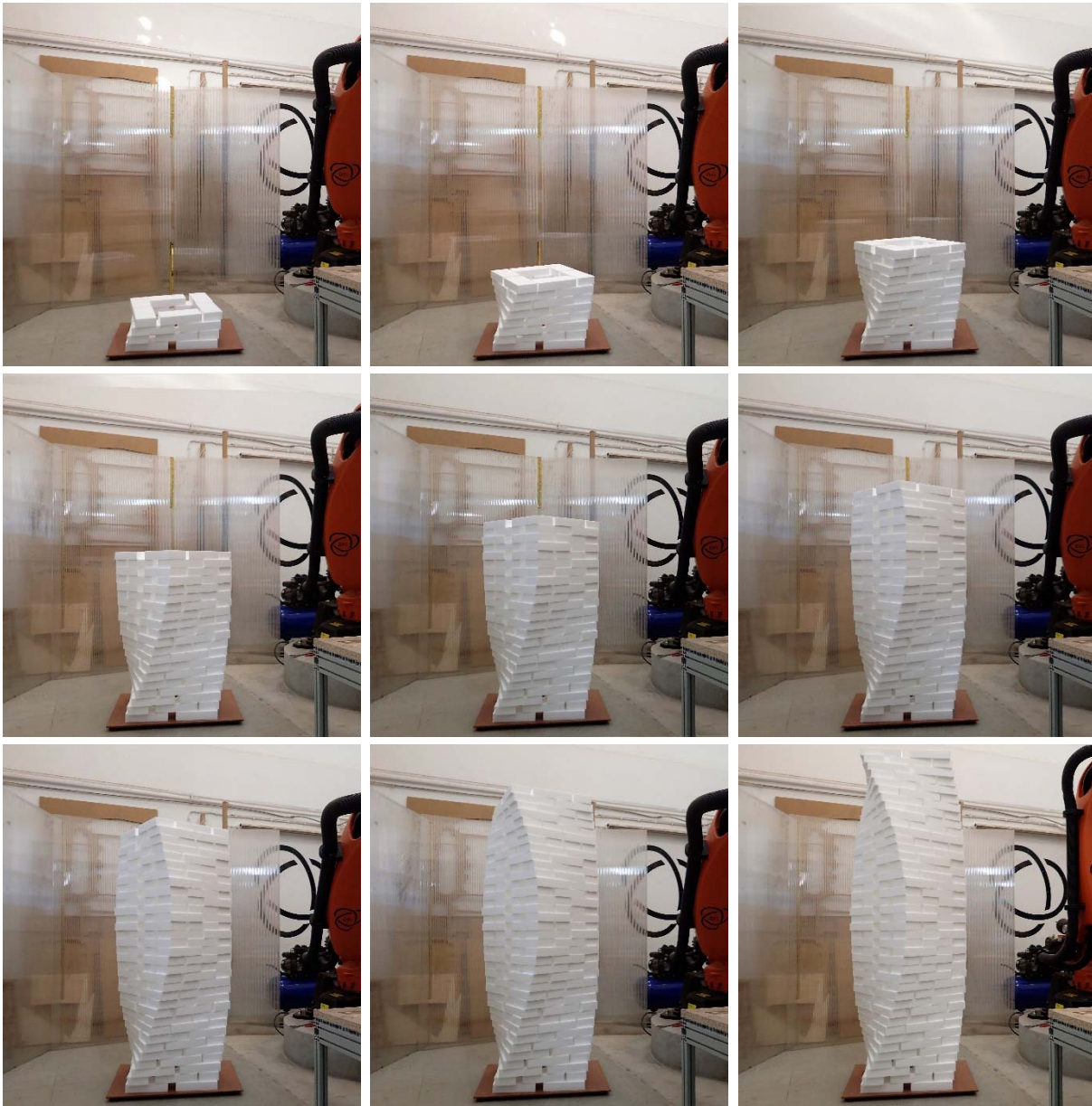


A fase de afinação visou localizar, no espaço e em relação ao *robot*, a base de construção e o primeiro tijolo do dispensador, bem com garantir que a ferramenta agarrava o tijolo pelo seu centro geométrico. Foi feito um teste com algumas camadas de tijolos sem colar, garantindo que a estrutura era construída dentro dos limites da base e que a distância entre tijolos era semelhante à do modelo tridimensional. Ainda que tenham sido feitas muitas afinações foram visíveis algumas imperfeições na estrutura. Estas tiveram a ver com as imprecisões geométricas e volumétricas dos tijolos em EPS utilizados.

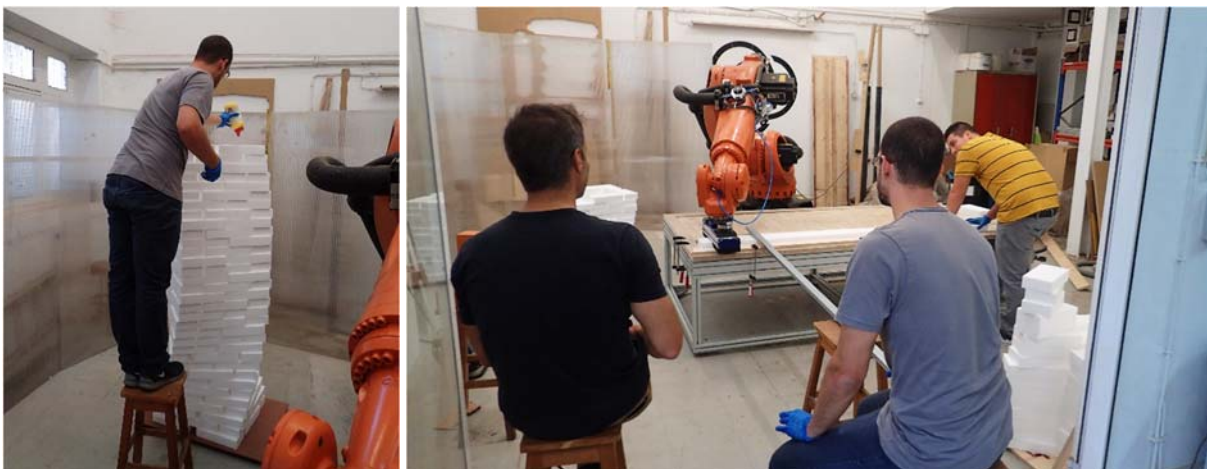
Após todas as afinações realizadas e testadas, exportou-se a rotina de fabricação de toda a estrutura para o *robot* [Fig. 109] e iniciou-se a fabricação. [Fig. 110] Mesmo com alguns procedimentos de fabricação manuais, [Fig. 111] a construção ficou bastante automatizada, levando apenas 50 minutos para concluir completamente a estrutura com mais de 2m de altura, composta por 246 tijolos. [Fig. 112].



▲ Fig. 109 \_ comandos para a fabricação no controlador do *robot*.

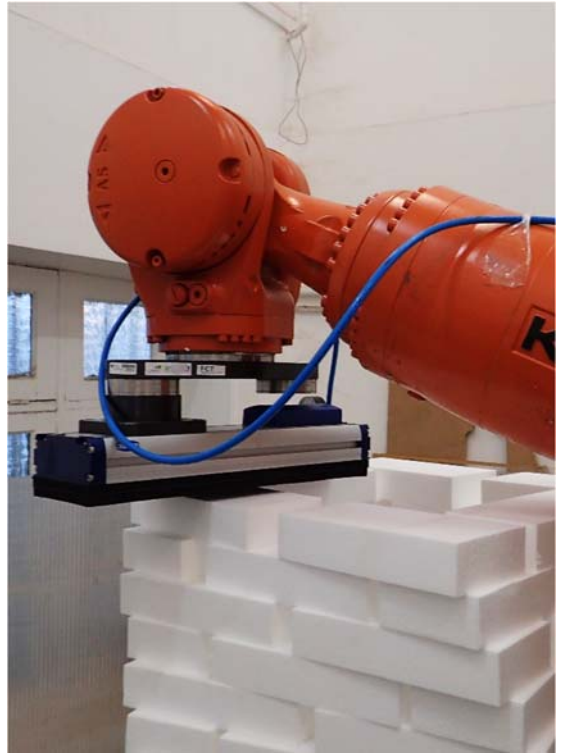
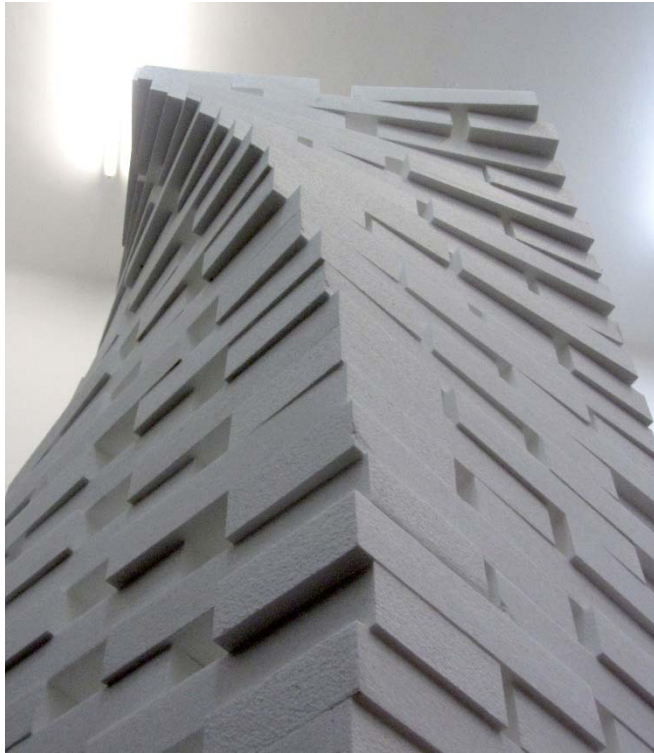


▲ Fig. 110 \_ processo de fabricação da estrutura em tijolos de EPS.



▲ Fig. 111 \_ procedimentos manuais de apoio à fabricação da esquerda para a direita colocação da cola de contacto, método que evitava a elevação os tijolos.





▲ Fig. 112 \_ estrutura em tijolos de EPS completa *de cima para baixo*  
pormenores do pilar, vista geral da estrutura.



## Capítulo 5 \_ Conclusão

### 5.1 \_ Reflexões finais

A investigação levada a cabo pelo autor pretendia incorporar os métodos de desenho e construção digital na arquitectura em tijolo, automatizando-a, permitindo a criação de estruturas complexas. Deste modo, seriam explorados conceitos formais complexos e diversificados com uma base de construção “rígida” e *standardizada*. A obra do Arq. Raúl Hestnes Ferreira foi uma grande mais-valia para a realização do trabalho prático. O seu interesse pelo desenho dos detalhes e o trabalho da plasticidade do tijolo foram uma grande influência para a exploração de novas formas e conceitos construtivos. As suas abóbadas na Casa da Cultura de Beja são um excelente exemplo de como os obstáculos construtivos podem servir de motivação para um desenho de alçado expressivo e os pormenores da Biblioteca Municipal da Moita abordados neste trabalho, são a prova de que o tijolo não é um material plasticamente rígido e que é possível obter-se formas e pormenores de grande valor plástico. O contributo pessoal de Hestnes Ferreira foi crucial para a compreensão da sua obra e dos motivos que o levaram a executar os pormenores daquela maneira.

Nas últimas décadas tem-se vindo a verificar na arquitectura, quer a nível académico quer profissional, um aumento significativo de investigação no campo das tecnologias de desenho e fabricação digitais. É notório o crescente interesse por parte dos arquitectos não só em criar novas formas, mas também na exploração da sua execução. Nesse sentido, o impacte mais visível das tecnologias de desenho e fabricação digitais existe a

dois níveis; por um lado existe uma maior expressividade nos projectos, pois existem mais meios que permitem o controlo e criação de formas geometricamente mais complexas, impossíveis de obter com métodos tradicionais de desenho; por outro lado, a concretização de algumas dessas formas torna-se possível com recurso às tecnologias de fabricação digital e robótica. Com níveis de precisão e flexibilidade superiores ao de qualquer outra tecnologia, estas permitem que geometrias complexas criadas pelas ferramentas de desenho digital sejam possíveis de construir. Fabio Gramazio e Mathias Kohler são o exemplo da adesão dos arquitectos em relação às tecnologias digitais de desenho e fabricação. Esta dupla suíça é pioneira na utilização da robótica e do desenho digital para produzir elementos arquitectónicos complexos e únicos. Uma grande parte seu trabalho assenta sobre a investigação de novas formas utilizando um elemento construtivo *standardizado*, como por exemplo o tijolo. É por essa razão que as suas experiencias são uma grande influência na realização e abordagem da presente dissertação.

Os métodos de desenho digital permitem a combinação entre o cálculo avançado de geometrias complexas e a sua representação. Estes processos de desenho e representação oferecem novas abordagens e perspectivas de projecto que não seriam possíveis nos métodos mais tradicionais de desenho. Aliados a programas de desenho paramétricos, tornam possível uma alteração das geometrias em tempo real, aproximando o pensamento arquitectónico da sua representação.

Os métodos de fabricação digital são um meio fundamental no uso destas tecnologias na arquitectura. Métodos como impressoras 3D permitem a construção de protótipos complexos à escala, de forma rápida e directa (do *software* de modelação para a impressora). O modelo é desenhado no computador e



exportado num formato que permite à impressora interpretar esse modelo e, de forma autónoma, este é construído. No caso de protótipos à escala real ou mesmo de estruturas à grande escala, os métodos de fabricação digital e robótica aproximam o desenho da fabricação.

Durante o trabalho prático da presente dissertação foram usadas as tecnologias de desenho digital que permitiram perceber como o desenho computacional permite abordar formas e estruturas complexas com precisão e de forma ajustável. Essas tecnologias possibilitaram a criação de formas complexas e de relações destas com o tijolo. Como o processo de desenho foi parametrizado, foi possível ter um *feedback* instantâneo das alterações efectuadas. Esse *feedback* permitiu visualizar as alterações em tempo real, tornando mais rápidas as decisões tomadas, quer formais quer construtivas.

Foram produzidos modelos de várias experiências recorrendo à impressão 3D, pois seria um processo muito moroso e pouco preciso reproduzir as estruturas obtidas de forma manual devido ao número de elementos e à sua complexidade. O contributo do Arq. Raúl Hestnes Ferreira foi importante no apoio à decisão da estrutura mais interessante e pertinente de acordo com o objectivo traçado na presente dissertação de entre todas as experiências realizadas. A construção da estrutura escolhida, à escala real, só foi possível devido ao braço robótico utilizado. A sua precisão e velocidade de trabalho são inalcançáveis pelo homem. Mesmo tendo em conta que houve alguma intervenção humana, este factor poderia ser contornado. A utilização de um segundo *robot*, que depositasse cola. Esse *robot* teria de estar coordenado com o utilizado para construir a estrutura, de modo a que a cada camada a cola fosse depositada antes do início da camada seguinte. Uma melhoria a fazer no *layout* de fabricação é

um redesenho do dispensador para evitar que os tijolos levantassem. No caso de os tijolos serem cerâmicos tal intervenção não seria necessária (somente por precaução), devido ao seu maior peso. A presente investigação demonstra que actualmente existem ferramentas que permitem extrapolar o banal no que toca ao desenho arquitectónico, e mais importante que existe meios de materializar esse desenho com materiais reais de construção. Mesmo que por vezes esses meios de construção sejam complementados com trabalho manual, é graças a eles que se torna possível a realização de projectos mais complexos. Como ficou registado no trabalho prático da presente dissertação o *robot* apenas levou 50 minutos a realizar toda a estrutura. Se se comparar o protótipo de um quinto da estrutura à escala real realizado pelo autor (Fig. 100) como a estrutura automatizada em termo de tempo e precisão fica claro que o *robot* é mais preciso e eficiente. Se o cenário fosse de uma produção em série estruturas complexas essa diferença seria ainda mais acentuada.

Neste trabalho ficou também demonstrado o potencial plástico que se é possível se obter a partir de uma estrutura composta apenas por um tipo de elemento industrializado. Esta é uma abordagem viável à utilização das tecnologias de fabricação digital à grande escala na arquitectura, pois não compreende uma geometria composta por um universo de elementos distintos, mas sim uma geometria que se pode criar a partir de elementos feitos em série. Este tipo de estruturas torna-se mais acessível, não perdendo o seu potencial expressivo.

Ao longo de toda a investigação foi interessante ver um arquitecto da “velha-guarda” tão empenhado em perceber e participar num projecto mais “ousado”. Isto prova que estes métodos podem suscitar interesse em qualquer tipo de

abordagem arquitectónica, seja ela mais regradas ou extravagantes e que começa a estabelecer uma posição no projecto de arquitectura. O uso das tecnologias de desenho e fabricação digital na arquitectura começa a ser cada vez mais uma realidade e não uma utopia. O conceito arquitectónico e a sua representação estão cada vez mais próximos e interligados e o processo de fabricação começa a ser mais directo. Conceitos mais arrojados a nível formal e estrutural podem começar a ser exequíveis de forma rápida e eficaz, mesmo que por vezes dentro de alguns limites. No entanto, se se continuar a trabalhar nesse sentido, os limites de hoje serão ultrapassados amanhã e essa vontade de quebrar os limites representa um grande avanço para a arquitectura contemporânea.



# Lista de acrónimos

<b>ABS</b>	Acrylonitrile butadiene styrene (Acrilonitrila butadieno estireno)
<b>CAD</b>	Computer aided design (Desenho assistido por computador)
<b>CNC</b>	Computer numerical control (Controlo numérico computadorizado)
<b>DFL</b>	Digital Fabrication Laboratory (Laboratório de Fabricação Digital)
<b>EPS</b>	Expanded PolyStyrene (Poliestireno expandido)
<b>ETH</b>	Eidgenössische Technische Hochschule (Instituto Federal de Tecnologia)
<b>FAUP</b>	Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto
<b>NURBS</b>	Non-uniform rational basis splines (Splines de base racional não uniformes)
<b>PU</b>	Polyurethane (Poliuretano)
<b>SAM</b>	Semi-automated masonry (Alvenaria semi-automatizada)
<b>TNA</b>	Thrust Network Analysis (Análise de redes de esforços)





## Lista de *softwares*

Rhinoceros      [www.rhino3d.com](http://www.rhino3d.com)

Grasshopper      [www.grasshopper3d.com](http://www.grasshopper3d.com)

Kuka | PRC      [www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc](http://www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc)



# Lista de comandos

Bake

Box Center

Brep

Contour

Cull Patern

Curve

Divide

Divide distance

Horizontal frames

Join

Loft

Offset

Orient

Rotate

Slider

Sweep 2 rails

Tree branch

Tree Statistic

Trim

Weaver



# Bibliografia

Aish, R. (2005). *Notes about Generative Componetns.*, Artigo apresentado na 23ª Conference of the Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe ECAADE, Lisboa.

Bärtschim R., Knauss, M., Bonwetsch, T., Gramazio, F., & Kohler, M. (2010). *Wiggled Brick Bond Advances in Architectural Geometry 2010*, pp. 137-147: Springer Vienna.

Beorkrem, Christopher (2013). *Material Strategies in Digital Fabrication*. Nova Iorque: Routledge.

Bonwetsch, T., Kobel, D., Gramazio, F., & Kohler, M. (2006). *The Informed Wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture. Synthetic Landscapes*. Artigo apresentado na 25ª Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture, Louisville.

Brell-Çokcan, S., & Braumann, J. (2012). *Digital and physical computing for industrial robots in architecture*. Artigo apresentado na 17ª International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, Hong Kong.

Brell-Çokcan, S., & Braumann, J. (2013). *Rob | Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*. Viena: Springer.

Campbell, J. W. P. (2005). *História Universal do Tijolo*. Casal de Cambra: Caleidoscópio.

- Carpo, M. (2001). *Architecture in the age of printing : orality, writting, typography, and printed images in the history of architectural theory*. The MIT Press.
- Cavieres, A., Gentry, R., & Al-Haddad, T. (2009). *Rich Knowledge Parametric Tools for Concrete Masonry Design Automation of Preliminary Structural Analysis, Detailing and Specifications*. Artigo apresentado na 26ª International Symposium on Automation & Robotics in Construction, Texas.
- Cavieres, A., Gentry, R., & Al-Haddad, T. (2011). Knowledge-based parametric tools for concrete masonry walls: Conceptual design and preliminary structural analysis. *Automation in Construction*, 20, pp. 716-728.
- Cavieres, A., Gentry, R., & Al-Haddad, T. (2014). *Building Information Modeling for Masonry: Defining and Modeling Masonry Walls*. Artigo apresentado na 9ª International Masonry Conference, Guimarães.
- Davis, L., Rippmann, M., Pawlofsky, T., & Block, P. (2011). *Efficient and Expressive Thin-tile Vaulting using Cardboard Formwork*. Artigo apresentado na 35ª Annual Symposium of IABSE / 52ª Annual Symposium of IASS, Londres.
- Davis, L., Rippmann, M., Pawlofsky, T., & Block, P. (2012). Innovative funicular tile vaulting: A prototype vault in Switzerland. *The Structural Engineer*, 90, pp. 46-56.
- Figueira, J. (2010). Nuno Portas, Hestnes Ferreira, Conceição Silva: Sobressaltos em Lisboa, anos 1960. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, 91.



- Gramazio, F., & Kohler, M. (2008). *Digital Materiality in Architecture*: Lars Müller.
- Hack, N., Lauer, W., Langenberg, S., Gramazio, F., & Kohler, M. (2013). Overcoming Repetition: Robotic fabrication processes at a large scale. *International journal of architectural computing*, 11, pp. 285-299.
- Helm, V., Willmann, J., Gramazio, F., & Kohler, M. (2014). *In-Situ Robotic Fabrication: Advanced Digital Manufacturing Beyond the Laboratory*. Artigo apresentado no In Gearing Up and Accelerating Cross-Fertilization between Academic and Industrial Robotics Research in Europe, Zurique.
- Katz, N. (2007). Parametric Modeling in AutoCAD, AECbytes, pp. 1-6.
- Leon, M. P. d., & Tehrani, N. (2002). Versioning: connubial reciprocities of surface and space. *Architectural design*, 72, pp. 18-28.
- Mitchell, J. W. (2001). Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds *Frank Gehry, Architect* pp. 353-363. Nova Iorque: Guggenheim Foundation.
- Neves, J. M. d. (2002). *Raúl Hestnes Ferreira Projectos 1959-2002*. Porto: ASA.
- Peters, S., & Belden, B. (2014c). SAM, the robotic bricklayer. *SAMRT/Dynamics of Masonry*, 1, pp. 10-14.
- Piller, F. T. (2005). Mass Customization: Reflections on the State of the Concep. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16, pp. 313-334.

Sacks, R., Eastman, C., & Lee, G. (2003). *Development of a Knowledge-Rich CAD System for the NorthAmerican Precast Concrete Industry*. Artigo apresentado na 23ª Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture Acadia, Muncie.

Saraiva, A. (2012). A reinterpretação de monumentalidade por Louis Kahn, e como Hestnes Ferreira foi influenciado. *Arquitectura Lusíada*, 4.

Sousa, J. P., Varela, P. A., & Martins, P. F. (2015). *Between manual and robotic approaches to brick constrution un architecture - expanding the craft of manual bricklaying wiith the help of video projection techniques*. Artigo apresentado na eCAADe 2015 33ª Conferência Anual.

Sousa, P. B. L. H. (2002). *Conhecer o tijolo para construir a Arquitectura*. Artigo apresentado no Seminário sobre Paredes de Alvenaria, Porto.

Tavares, M. A. (2003). *Além da Geometria* (1ª ed.). Lisboa: Editorial Estampa.

## **\_ Electrónica**

Barrete-de-clérigo. (2014). In Infopedia. Disponível em <http://www.infopedia.pt>

Daniel, I. M., & Guindi, I. M. (2015). Z53 Social Housing. Disponível em <http://www.map-mx.com/> [06.07.2015]

Drone. (2015). In *Infopedia*. Disponível em <http://www.infopedia.pt>

Gramazio, F., & Kohler, M. (2014a). Flight Assembled Architecture, 2011-2012. Disponível em

<http://www.gramaziokohler.com/web/e/projekte/209.html> [20.04.2015]

Gramazio, F., & Kohler, M. (2014b). Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Switzerland, 2006. Disponível em <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/52.html> [15.04.2015]

Gramazio, F., & Kohler, M. (2014c). Pike Loop, Manhattan, New York, 2009. Disponível em <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/159.html> [15.04.2015]

Gramazio, F., & Kohler, M. (2014d). The Programmed Wall, ETH Zurich, 2006. Disponível em <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/81.html> [12.05.2015]

Gramazio, F., & Kohler, M. (2014e). R-O-B, 2007-2008. Disponível em <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/135.html> [10.07.2015]

Gramazio, F., & Kohler, M. (2014f). Structural Oscillations, Venice, 2007-2008. Disponível em <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/142.html> [10.05.2015]

Peters, S., & Belden, B. (2014a). SAM, the Robotic Bricklayer. Disponível em <http://www.dynamicsofmasonry.com/content/sam-robotic-bricklayer> [13.07.2015]

*Plug-in.* (2015). In *Infopedia*. Disponível em <http://www.infopedia.pt>

*Script.* (2015). In *Infopedia*. Disponível em <http://www.infopedia.pt>

## **\_ Bibliografia complementar**

Anónimo, (2012). Manual de Aplicação de tijolos de face à vista e de pavers cerâmicos. (Este manual assim como os seus conteúdos são propriedade exclusiva da Cerâmica Vale da Gândara S.A)

Caneparo, L. (2014). *Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction*. Springer

Davidson, S. (2015). [www.grasshopper3d.com](http://www.grasshopper3d.com)

ElAshry, K. (2013). *Robotic bricklaying – towards adaptive robotic*. Londres. Tese de Mestrado.

Handisyde, C. C. (1982). *Hard landscape in brick*. Londres, The Architectural Press.

Helm, V., Ercan, S., Gramazio, F. & Kohler M. (2012). *In-situ robotic construction: extending the digital fabrication chain in architecture*. Artigo apresentado na 32ª Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA 2012), San Francisco. Disponível em [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-03838-4\\_4](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-03838-4_4) [06.05.2015]

Kahn, N. (2003). My architect – a son's journey [ficheiro video]. Disponível em <https://vimeo.com/9418890> [23.03.2015]

Payne, A., Issa, R. (2009). *Grasshopper Primer*. Disponível em  
[http://static1.squarespace.com/static/51c6f9f3e4b0e47ad1bbc71c/t/521cf940e4b021571fc7d3a5/1377630528615/Grasshopper+Primer\\_Second+Edition\\_090323.pdf](http://static1.squarespace.com/static/51c6f9f3e4b0e47ad1bbc71c/t/521cf940e4b021571fc7d3a5/1377630528615/Grasshopper+Primer_Second+Edition_090323.pdf)  
[10.04.2015]

Robotsinarchitecture (2011) Introduction to KUKA | prc  
[ficheiro vídeo]. Disponível em  
<https://vimeo.com/30874737> [08.09.2015]





## Créditos de imagens

**Fig. 1** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 2** \_ Imagem do autor.

**Fig. 3** \_ Imagem do autor.

**Fig. 4** \_ [http://transparencias.info/imagens/dez\\_2010/entrevista.jpg](http://transparencias.info/imagens/dez_2010/entrevista.jpg) [23.08.2015]

**Fig. 5** \_ Neves, 2002: 189

[http://www.domusweb.it/content/dam/domusweb/en/from-the-archive/2012/09/08/louis-kahn-in-dacca/big\\_392801\\_7614\\_2535.jpg](http://www.domusweb.it/content/dam/domusweb/en/from-the-archive/2012/09/08/louis-kahn-in-dacca/big_392801_7614_2535.jpg) [24.08.2015]

Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

<https://arqteoria.files.wordpress.com/2013/06/51-kahn-dacca2a.png> [24.08.2015]

**Fig. 6** \_ Neves, 2002: 62

**Fig. 7** \_ Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

**Fig. 8** \_ Neves, 2002: 28

Neves, 2002: 28

**Fig. 9** \_ Neves, 2002: 9

Neves, 2002: 152

Neves, 2002: 93

**Fig. 10** \_ Neves, 2002: 58

**Fig. 11** \_ Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

**Fig. 12** \_ Neves, 2002: 61

Neves, 2002: 156

Neves, 2002: 89

Imagem da autoria de José Pedro Sousa.

**Fig. 13** \_ [http://3.bp.blogspot.com/\\_D\\_sPgNFggXE/S4erX7Y-UdI/AAAAAAAAAHU/GvPSSINzDxk/s1600-h/10010078.JPG](http://3.bp.blogspot.com/_D_sPgNFggXE/S4erX7Y-UdI/AAAAAAAAAHU/GvPSSINzDxk/s1600-h/10010078.JPG) [13.10.2014]

**Fig. 14** \_ [http://4.bp.blogspot.com/\\_D\\_sPgNFggXE/S4est50LShI/AAAAAAAAAHs/nz3kGm5l8KE/s1600-h/10010083.JPG](http://4.bp.blogspot.com/_D_sPgNFggXE/S4est50LShI/AAAAAAAAAHs/nz3kGm5l8KE/s1600-h/10010083.JPG) [24.08.2015]  
[http://cdn.lightgalleries.net/4c8905b9ef682/images/Ahmedabad\\_Gujarat\\_India\\_Campomor\\_Architects\\_19-1.jpg](http://cdn.lightgalleries.net/4c8905b9ef682/images/Ahmedabad_Gujarat_India_Campomor_Architects_19-1.jpg) [24.08.2015]

**Fig. 15** \_ Neves, 2002: 60

**Fig. 16** \_ Neves, 2002: 155  
Google maps [25.04.2015]

**Fig. 17** \_ Neves, 2002: 159

**Fig. 18** \_ Neves, 2002: 157

**Fig. 19** \_ Imagem da autoria de José Pedro Sousa.

**Fig. 20** \_ Imagem da autoria de José Pedro Sousa.  
Imagem da autoria de José Pedro Sousa.

**Fig. 21** \_ Imagem do autor.

**Fig. 22** \_ Neves, 2002: 88

**Fig. 23** \_ Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

**Fig. 24** \_ Imagem do autor.

**Fig. 25** \_ Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.  
Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

**Fig. 26** \_ Campbell, 2005: 174

**Fig. 27** \_ [http://www.nadaaa.com/wp-content/uploads/2011/11/TongxianGatehouse\\_1.jpg](http://www.nadaaa.com/wp-content/uploads/2011/11/TongxianGatehouse_1.jpg)  
[24.08.2015]

**Fig. 28** \_ Imagem do autor.

**Fig. 29** \_ [http://www.nadaaa.com/wp-content/uploads/2011/11/TongxianGatehouse\\_13.jpg](http://www.nadaaa.com/wp-content/uploads/2011/11/TongxianGatehouse_13.jpg)  
[24.08.2015]

[http://www.nadaaa.com/wp-content/uploads/2011/11/TongxianGatehouse\\_15.jpg](http://www.nadaaa.com/wp-content/uploads/2011/11/TongxianGatehouse_15.jpg)  
[24.08.2015]

**Fig. 30** \_ [http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/532c91cee4b0fcd40d957284/1395429864634/2013\\_04\\_MapMx\\_Z53\\_311.jpg?format=t=500w](http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/532c91cee4b0fcd40d957284/1395429864634/2013_04_MapMx_Z53_311.jpg?format=t=500w) [24.08.2015]

[http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/5312982ee4b060dc36b3dcd8/1393727535842/2013\\_04\\_MapMx\\_Z53\\_121.jpg?format=1000w](http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/5312982ee4b060dc36b3dcd8/1393727535842/2013_04_MapMx_Z53_121.jpg?format=1000w) [24.08.2015]

[http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/531297dce4b04bcb37e6e225/1393727455571/2013\\_04\\_MapMx\\_Z53\\_320.jpg?format=1000w](http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/531297dce4b04bcb37e6e225/1393727455571/2013_04_MapMx_Z53_320.jpg?format=1000w) [24.08.2015]

[http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/53129839e4b0c28159709518/1393727557498/2013\\_04\\_MapMx\\_Z53\\_172.jpg?format=1000w](http://static1.squarespace.com/static/52e43357e4b0edad41208446/53129703e4b000ec7f81ed94/53129839e4b0c28159709518/1393727557498/2013_04_MapMx_Z53_172.jpg?format=1000w) [24.08.2015]

**Fig. 31** \_ <http://anagramarchitects.com/wp-content/uploads/sahrdc-25.jpg> [24.08.2015]

**Fig. 32** \_ <http://anagramarchitects.com/wp-content/uploads/SAHRDC-04.jpg> [24.08.2015]

<http://anagramarchitects.com/wp-content/uploads/SAHRDC-09.jpg> [24.08.2015]

<http://anagramarchitects.com/wp-content/uploads/SAHRDC-03.jpg> [24.08.2015]

**Fig. 33** \_ <http://msbim.estp.fr/wp-content/uploads/2015/01/villemard.png> [02.07.2015]

**Fig. 34** \_ [http://www.kuka-systems.com/NR/rdonlyres/BF69182F-CBD5-4777-BAFF-9B569759B80E/0/pressrelease\\_zh122012.jpg](http://www.kuka-systems.com/NR/rdonlyres/BF69182F-CBD5-4777-BAFF-9B569759B80E/0/pressrelease_zh122012.jpg) [24.08.2015]

**Fig. 35** \_ <http://triviumproject.com/wp-content/uploads/2011/12/BRUNELLESCHI-Filippo-View-of-the-Cathedral-1420-36-Duomo-Florence-924x1024.jpg> [02.07.2015]

<https://fabiap2012.files.wordpress.com/2012/01/eladio-dieste-wall.jpg> [02.07.2015]

<http://www.grad.hr/sgorjanc/Links/perspektiva/predavanja/konoidi/sagrada3.jpg>  
[13.09.2015]

**Fig. 36** \_ Imagem do autor, baseada em Bonwetsch et al., 2006: 491.

**Fig. 37** \_ Campbell, 2005: 210

**Fig. 38** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 39** \_ [http://www.concreteconstruction.net/Images/570468741\\_Const-Robotics\\_1\\_tcm452180174.jpg?width=600](http://www.concreteconstruction.net/Images/570468741_Const-Robotics_1_tcm452180174.jpg?width=600) [25.08.2015]

**Fig. 40** \_ <http://brickdesign.rob-technologies.com/wordpress/wpcontent/uploads/2012/01/screenshot021.png> [02.07.2015]

**Fig. 41** \_ Imagem do autor.

**Fig. 42** \_ Beorkrem, 2013: 146-147

**Fig. 43** \_ Davis et al., 2011: 5

**Fig. 44** \_ <http://krisdedecker.typepad.com/.a/6a00e0099229e888330162fe3027e5970d-pi>  
[02.07.2015]

Davis et al., 2012: 50

Davis et al., 2011: 52

<http://krisdedecker.typepad.com/.a/6a00e0099229e888330154358edee0970c-pi>  
[02.07.2015]

**Fig. 45** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/040/060306\\_040\\_ProduktionCurtainWal\\_SilvanOesterle\\_023\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/040/060306_040_ProduktionCurtainWal_SilvanOesterle_023_WM.jpg) [25.08.2015]

Bonwetsch et al., 2006: 492

Bonwetsch et al., 2006: 493

**Fig. 46** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/040/060333\\_040\\_BilderDerDreiWaende\\_ML\\_045\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/040/060333_040_BilderDerDreiWaende_ML_045_WM.jpg) [25.08.2015]

[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/040/060333\\_040\\_BilderDerDreiWaende\\_ML\\_025\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/040/060333_040_BilderDerDreiWaende_ML_025_WM.jpg) [25.08.2015]

[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/040/060333\\_040\\_BilderDerDreiWaende\\_ML\\_038\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/040/060333_040_BilderDerDreiWaende_ML_038_WM.jpg) [25.08.2015]

- Fig. 47** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/036/061116\\_036\\_Baudokumentation\\_RalphFeiner\\_001\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/036/061116_036_Baudokumentation_RalphFeiner_001_WM.jpg) [02.07.2015]  
[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/036/060823\\_036\\_Dokumentation\\_RalphFeiner\\_006\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/036/060823_036_Dokumentation_RalphFeiner_006_WM.jpg) [02.07.2015]  
[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/036/061116\\_036\\_Baudokumentation\\_RalphFeiner\\_003\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/036/061116_036_Baudokumentation_RalphFeiner_003_WM.jpg) [02.07.2015]  
[http://tectonicablog.com/wp-content/uploads/2010/08/060719\\_036\\_Baustelle\\_ML\\_082\\_PR.jpg](http://tectonicablog.com/wp-content/uploads/2010/08/060719_036_Baustelle_ML_082_PR.jpg) [02.07.2015]
- Fig. 48** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/036/061130\\_036\\_RenderingBuilding\\_TB\\_001\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/036/061130_036_RenderingBuilding_TB_001_WM.jpg) [25.08.2015]  
[http://s3.amazonaws.com/europaconcorsi/project\\_images/4511686/060716\\_036\\_LagerungUndTransport\\_ML\\_003\\_PR\\_full.jpg](http://s3.amazonaws.com/europaconcorsi/project_images/4511686/060716_036_LagerungUndTransport_ML_003_PR_full.jpg) [02.07.2015]
- Fig. 49** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/063/080813\\_063\\_Bauprozess\\_MS\\_066\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/063/080813_063_Bauprozess_MS_066_WM.jpg) [25.08.2015]
- Fig. 50** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/063/080702\\_063\\_Grundriss\\_MS\\_002\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/063/080702_063_Grundriss_MS_002_WM.jpg) [25.08.2015]
- Fig. 51** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/063/080817\\_063\\_AufnahmenExponat\\_AlessandraBello\\_16\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/063/080817_063_AufnahmenExponat_AlessandraBello_16_WM.jpg) [25.08.2015]  
[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/063/081003\\_063\\_StructuralOscillations\\_AlessandraBello\\_023\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/063/081003_063_StructuralOscillations_AlessandraBello_023_WM.jpg) [25.08.2015]  
[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/063/081003\\_063\\_StructuralOscillations\\_AlessandraBello\\_026\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/063/081003_063_StructuralOscillations_AlessandraBello_026_WM.jpg) [25.08.2015]  
[http://www.designexplorations.org/pages/resources/uploads/90/080912\\_3774\\_LR.jpg](http://www.designexplorations.org/pages/resources/uploads/90/080912_3774_LR.jpg) [25.08.2015]
- Fig. 52** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/063/080704\\_063\\_ElementeMatrix\\_MS\\_001\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/063/080704_063_ElementeMatrix_MS_001_WM.jpg) [25.08.2015]
- Fig. 53** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/078/091102\\_078\\_FinishedWall\\_ML\\_011\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/078/091102_078_FinishedWall_ML_011_WM.jpg) [16.09.2015]
- Fig. 54** \_ Bärtschim et al., 2010: 139.

**Fig. 55** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/078/091016\\_078\\_FourthElement\\_ML\\_019\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/078/091016_078_FourthElement_ML_019_WM.jpg) [16.09.2015]  
[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\\_Web/M/078/091102\\_078\\_FinishedWall\\_ML\\_009\\_WM.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02_Web/M/078/091102_078_FinishedWall_ML_009_WM.jpg) [16.09.2015]

**Fig. 56** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02\\_Web/122/111214\\_FlyingVehicle\\_09\\_WE.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02_Web/122/111214_FlyingVehicle_09_WE.jpg) [25.08.2015]  
[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02\\_Web/122/111214\\_FAA\\_Tower\\_01\\_WE.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02_Web/122/111214_FAA_Tower_01_WE.jpg) [25.08.2015]

**Fig. 57** \_ [http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02\\_Web/122/111214\\_ViewOutside\\_27\\_WE.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02_Web/122/111214_ViewOutside_27_WE.jpg) [25.08.2015]  
[http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02\\_Web/122/111214\\_ViewStreet\\_28\\_WE.jpg](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/bilder/02_Web/122/111214_ViewStreet_28_WE.jpg) [25.08.2015]

**Fig. 58** \_ Imagem do autor.  
Imagem do autor.

**Fig. 59** \_ Imagem do autor.

**Fig. 60** \_ Imagem do autor.  
Imagem do autor.  
Imagem do autor.  
Imagem do autor.

**Fig. 61** \_ Imagem do autor.

**Fig. 62** \_ Imagem do autor.

**Fig. 63** \_ Imagem do autor.

**Fig. 64** \_ Imagem do autor.

**Fig. 65** \_ Imagem do autor.  
Imagem do autor.

**Fig. 66** \_ Imagem do autor.  
Imagem do autor.  
Imagem do autor.



**Fig. 67** \_ Imagem do autor.

**Fig. 68** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 69** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 70** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 71** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 72** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 73** \_ Imagem da autoria de José Pedro Sousa.

**Fig. 74** \_ Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

**Fig. 75** \_ Imagem do autor.

**Fig. 76** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 77** \_ Imagem do autor.

**Fig. 78** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 79** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 80** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 81** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 82** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 83** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 84** \_ Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

**Fig. 85** \_ Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

Neves, 2002: 95

Imagem cedida pelo Arq. Raúl Hestnes Ferreira.

Imagem do autor.

**Fig. 86** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 87** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 88** \_ Imagem do autor.

**Fig. 89** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 90** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 91** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 92** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 93** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 94** \_ Imagem do autor.

**Fig. 95** \_ <http://www.valegandara.com/produtos/images/tfvmain.png> [08.09.2015]

<http://www.valegandara.com/produtos/images/macicomain.png> [08.09.2015]

**Fig. 96** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 97** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 98** \_ Imagem do autor.

**Fig. 99** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 100** \_ Imagem do autor.

Imagem do autor.

Imagem do autor.

**Fig. 101** \_ Imagem do autor.

**Fig. 102** \_ Imagem do autor.

**Fig. 103** \_ Imagem do autor.

**Fig. 104** \_ KR QUANTEC extra Specifications: 19. Disponível em [http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa\\_Spez\\_KR\\_QUANTEC\\_extra\\_HA\\_en.pdf](http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa_Spez_KR_QUANTEC_extra_HA_en.pdf)

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

**Fig. 105** \_ Imagem do autor.

**Fig. 106** \_ Imagem do autor.

**Fig. 107** \_ Imagem do autor.

**Fig. 108** \_ Imagem do autor.

**Fig. 109** \_ Imagem do autor.

**Fig. 110** \_ Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

**Fig. 111** \_ Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

**Fig. 112** \_ Imagem do autor.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

Imagem cedida pelo DFL.

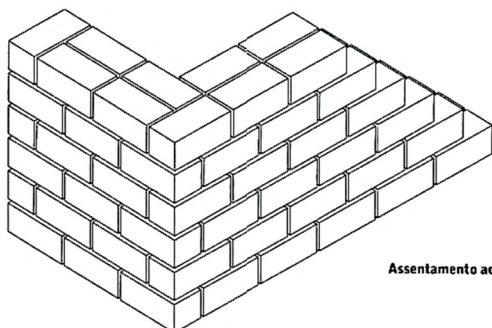




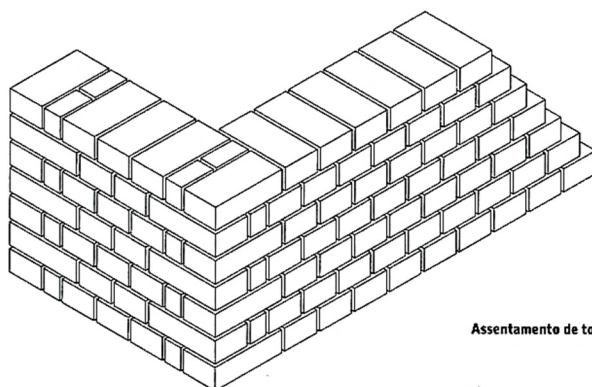
**Anexos**



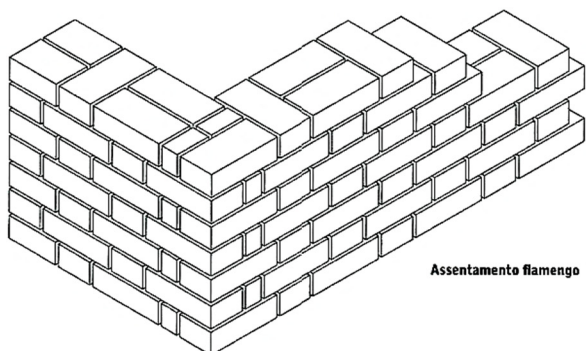
## A \_ Exemplos de assentamentos de tijolo



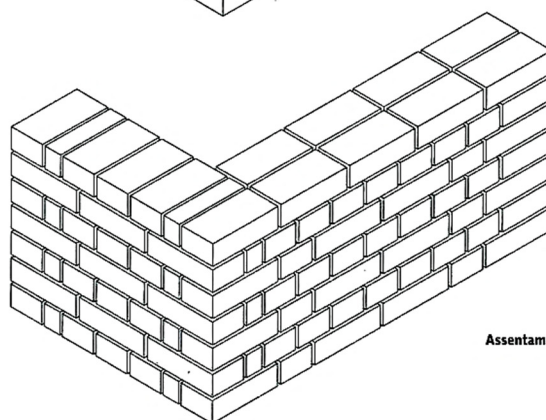
**Assentamento ao leito**



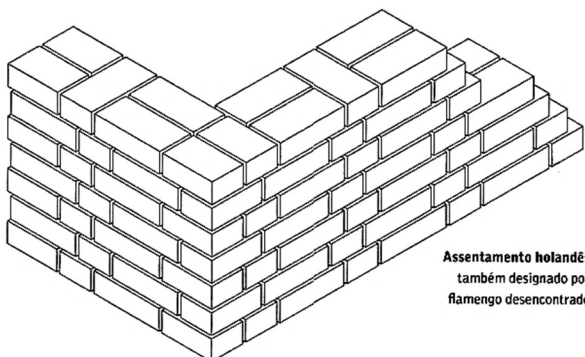
**Assentamento de topo**



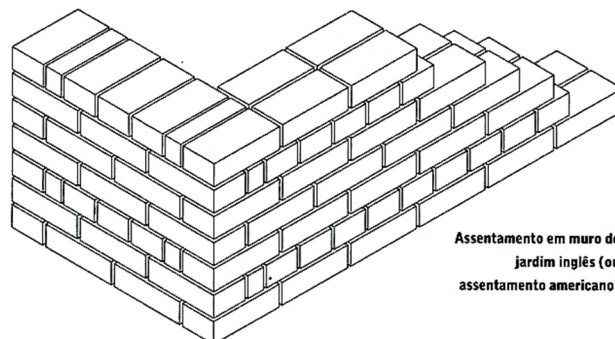
**Assentamento flamengo**



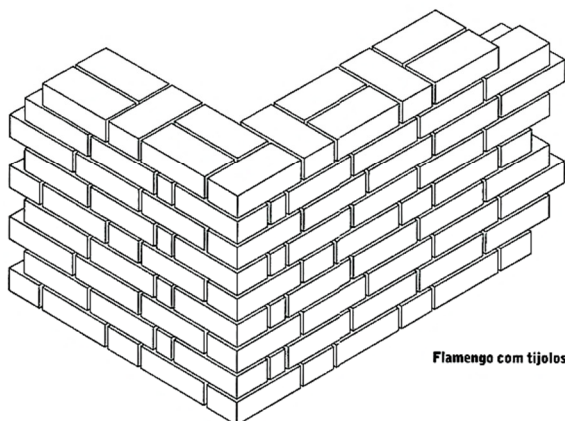
**Assentamento inglês**



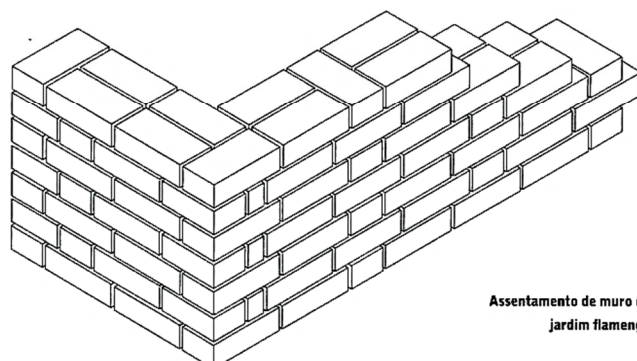
**Assentamento holandês  
também designado por  
flamengo desencontrado**



**Assentamento em muro de  
jardim inglês (ou  
assentamento americano)**



**Flamengo com tijolos ao leito**



**Assentamento de muro de  
jardim flamengo**



## **B \_ Conversas com Raúl Hestnes Ferreira**

**\_ 9 de Janeiro de 2015**

**RO – Esta dissertação tem como um dos objectivos explorar a plasticidade do tijolo, pois este é visto como um material formalmente rígido. Considera o tijolo um material onde a procura de novas formas esteja limitada?**

RHF – Nós temos um pórtico em que as colunas vão rodando. Temos pilares de secção quadrada que partem duma situação com uma determinada geometria e depois vão rodando até chegarem à mesma posição. Tudo isto com a colaboração dos engenheiros. O engenheiro dizia “eu não sei como isto vai aguentar”, porque tem aquelas colunas e depois por cima tem uma grande parede pesadíssima.

**RO – Essas colunas não estão reforçadas?**

RHF – estão reforçadas, têm o interior em betão. Não quis prescindir dessa situação. Pela sua regularidade, pela sua necessidade de criar um modelo de execução logico acaba por envolver as pessoas todas: o arquitecto, o engenheiro, o executante, o encarregado, as pessoas sentem-se muito envolvidas. Se for uma parede toda rebocada não tem esse desafio para os executantes, e aqui à partida já têm e pode ser interessante de explorar neste tipo de ensaios.

**RO – na leitura que fizemos na casa da cultura de beja, relativamente as abóbodas, o arquitecto queria fazer as abobadas daquela forma, mas em termos de execução...**

RHF - eu não sabia se havia pessoas que faziam. Eu falei a um engenheiro “se não for possível fazer recorrendo ao sistema artesanal pode-se fazer em betão?” ele disse que não havia qualquer problema, mas depois havia pessoas em Serpa capazes de o fazer. Mas não sei como está hoje em dia.

**RO – essa é uma das questões. Possivelmente hoje em dia é ainda mais difícil.**

RHF – se calhar não é. Eles lamentavam não haver mais desafios, mais encomendas.

**RO – mas possivelmente essa falta de encomendas pode ter levado ao desaparecimento de mestres desse ofício.**

RHF – Exactamente, mas eventualmente podem permanecer. Eles tinham feito uma obra vulgar, na qual nem se identificava o tijolo, penso que se tratava de uma igreja na Covilhã. Eles falavam muito disso, mas o tijolo estava todo rebocado. Por isso pode ser interessante saber se existe alguém capaz de fazer, ainda, abóbodas. Eu tenho a sensação que existe, agora onde e o que fazem não sei.

**RO – nessa abóboda, existe uma fotografia onde se vêem nervuras resultantes da colocação do tijolo a 90 graus, mas por fora não são visíveis essas nervuras. Portanto a abóbada é depois fechada?**

RHF – Aquilo até certo nível tinha de ter tijolos mais largos, mas a certa altura passava a ter outra posição, mais estreito, porque já não era necessário. Havia um determinado ponto onde poderia haver uma quebra e portanto eles teriam de utilizar daí para baixo tijolos mais largos e desse ponto para cima tijolos mais estreitos. Isso é uma questão tradicional, eles já sabiam. Depois a abóbada foi coberta. O meu interesse aí era como que verificar o lado português, era uma coisa que me interessava, como é que nós aqui, na ponta de europa, e não só na ponta da europa, na ponta duma mancha que vai quase até a china, digamos assim, vai daqui ao médio oriente, e eu achava interessante ver qual é o nosso papel e era uma das preocupações que eu tinha, nós tão modestos, tão pouco conhecidos, tao pouco repercutidos, só agora é que começamos a ser mais repercutidos e muito devido ao Siza, porque o Siza de facto é um símbolo, toda a gente o conhece, é conhecido lá fora etc; ele ajudou muito a que se interessassem pelos portugueses, neste momento os portugueses começam a ser muito procurados. E para mim é interessante ver o nosso papel no meio disto tudo: o que é que nós fizemos e como é que fizemos e porque é que fizemos. E de facto o tijolo é uma coisa que usámos muito pouco, quase nunca usamos, usamos só em edifícios portuários e num ou outro caso especial. É claro que nos temos um concorrente muito forte que é a pedra, que os espanhóis não têm tanta como nós. Os espanhóis usaram muito o tijolo, bem ou mal eles usam muito mais o tijolo que nós. E sobretudo o que me interessou muito foi essa aptidão dos trabalhadores aderirem muito a essa solução. Ficam no fim muito satisfeitos por terem feito aquela obra, uma obra invulgar. Tem esse lado que é muito interessante e satisfatório. Mas é claro que aqui a solução é outra, é quase substituímos o operário.

**RO - E foram feitas sem qualquer tipo de apoio?**

RHF – Sim, eles não usaram nenhuma cofragem. Eles sabiam, e sabem, fazer sem necessidade de recorrer a cofragem. Eu depois descobri uma quinta entre Beja e a Vidigueira, que tinha as abobadas exactamente iguais às nossas, e mais tarde outras em Espanha.

**RO – Há alguma coisa na sua obra em tijolo que venha de Filadelfia, da sua experiencia com Louis Kahn?**

RHF – Sim, claro. Por isso é que eu refiro este contínuo cultural. Eu quando estive lá colaborei nos edifícios que o Kahn fez para a Índia e para o Paquistão, que foi um impulso bastante forte que me levou mais tarde a fazer esta pesquisa. E trabalhei em algumas residências que também eram feitas com tijolo. Mas é curioso que eu lhe sugeri fazerem uns contínuos de abóbadas mas eles na altura não se mostrou muito interessado.

**RO – Fazendo um paralelo, como quando lhe mostrei aquele pavilhão da cortiça em que disse que agora temos de desenhar todas as pecinhas, e o tijolo é um tipo de construção em que nos também para cumprir a nossa ideia desenhamos praticamente peça a peça enquanto que com outros materiais já não é necessário tanto desenho.**

RHF – O tijolo exige muito no projecto. Na casa em Queijas, foi interessante, porque nos obrigou a estudar, estudar manuais antigos de tijolo e verificar quais eram as regras. Por exemplo se temos um vão de uma determinada dimensão é uma coisa mas se é o dobro é outro processo, a cobertura do vão será completamente diferente. Portanto a partir desse estudo, necessário, porque foi a primeira vez que abordamos um projecto com tijolo, ficamos a saber os problemas que sempre houve com a construção em tijolo e as características e capacidades do tijolo. Porque é como disse, são peças pequenas, têm de se juntar e todo esse processo é distinto dos outros materiais.

**RO – Neste trabalho interessa-me perceber as potencialidades das tecnologias, mas também perceber os problemas que ela cria ou outras virtudes que esta pode ir apagando e este aspecto do prazer dos trabalhadores que assentam tijolo parece-me algo importante, a pensar. Nós enquanto arquitectos estaríamos a identificar dois ou três temas da obra: os cunhais da biblioteca da Moita, a abóbada, o tema da abóbada em que esta teria outra geometria, onde não seria regular ou supondo que queríamos efeitos, já que o tijolo fica visível, desenhar um padrão, colocando o tijolo de formas variadas, mas estamos apenas a especular, mas no fundo o objectivo seria chegar a uma situação geométrica onde fosse difícil se fazer uns desenhos para alguém olhar para os desenhos e repetir. Porque eu acho que é aí que estas tecnologias podem ser relevantes, quando nos sentimos que precisamos duma ajuda, dum completo. Portanto estávamos a identificar alguns temas, para produzir alguns modelos no computador, como por exemplo este detalhe das esquinas, imaginando que as paredes ao invés de serem planas teriam uma ligeira curvatura, mas que na esquina queríamos fazer o mesmo detalhe. Ou que queremos criar variações no detalhe como por exemplo a medida que vai subindo vais aumentado o avanço do tijolo. Trabalhar um bocadinho a partir dessa ideia. A ideia seria então, em termos de métodos, produzir modelos digitais disso e depois tentar contruir protótipos. Outra coisa que gostávamos de deixar aqui em cima da mesa é se alguma vez tiver alguma experiência ou algo que tenha ficado pelo caminho, podemos fazer o processo ao contrário, no qual nos estudamos a forma ou uma ideia e com esta tecnologia tentar concretizar.**



**\_ 14 de Agosto de 2015**

**RO – O objectivo desta segunda entrevista é que o arquitecto tenha contacto com o que se fez até agora, ficar a par do estado do trabalho e, sabendo do tipo de meios que dispomos no laboratório, responder ao desafio deixado na última entrevista: se na altura da construção da Biblioteca da Moita ou da Casa da Cultura de Beja tivesse acesso a este tipo de tecnologias o que mudaria? Para o por a par do tipo de coisas que somos capazes de produzir tenho aqui alguns exemplos desenvolvidos ao longo da tese e fabricados no DFL.**

**RHF – Esta abóbada aqui... (exemplo 1 – ver página 73)**

**RO – Essa abóbada é inspirada na que o arquitecto desenhou na Casa da Cultura. Foi desenhada a partir do mesmo processo, no entanto usou-se as nervuras pelo interior para se obter uma plasticidade que, na minha opinião se perde quando é tapada na Casa da Cultura, embora esteja ciente que essas nervuras têm uma razão estrutural.**

**RHF – E em relação ao cálculo estrutural?**

**RO – Este exemplo de abóbada é único no trabalho e foi apenas para explorar uma expressão com a linguagem usada por si, pois os outros testes de abóbadas serão feitos com tijolos horizontais que se vão desfasando como degraus. Assim a produção era muito mais rápida pois o robot só precisaria de ir depositando tijolos não teria de os segurar inclinados à espera que a argamassa secasse. Em relação aos cunhais temos vários estudos. Temos este exemplo (exemplo 1 – ver página 60) é semelhante ao que o arquitecto fez, que é a modificação de um cunhal comum até atingir o estado dos cunhais da Biblioteca da Moita. Este (exemplo 4 - ver pagina 62) é uma variação do que lhe mostrei anteriormente.**

**RHF – Como é feito o processo de desenho destas formas?**

**RO – São usados dois programas de computador, eu posso-lhe mostrar. Temos aqui a definição que controla tudo e aqui podemos inserir os dados que desejarmos: o número de tijolos por fileira a forma das superfícies e o programa automaticamente gera os tijolos a volta da forma pretendida.**

**RHF – Aquela zona vazia é mesmo vazia?**

**RO – Sim, aqui o espaçamento entre tijolos é vazio, no entanto em construção este pode ser cheio com argamassa, ou mesmo reduzir esse espaço aumentando o número de tijolos. Por exemplo no caso dos pilares o processo é o mesmo mas em vez de duas superfícies são quatro e o número de tijolos tem de ser reduzido porque os pilares tem menos superfície.**

RHF – Os tijolos seguem sempre a superfície não é?

**RO – Sim, o programa posiciona os tijolos de forma a recriar a superfície o mais fielmente. Por vezes há um ou outro que fica mal posicionado, ou a voar ou sobreposto, ou com uma rotação estranha que se tem de corrigir à mão, mas normalmente só é superfícies mais complexas.**

RHF – Então algum erro que o engenheiro veja ou assim é corrigível... eu acho muito interessante este. (exemplo 4 - ver página 68)

**RO – Nesse caso o movimento das superfícies é de torção ate meio e depois “distorce” por assim dizer.**

RHF – Mas neste caso qual é diferença de um nível para o outro, entre a primeira e a segunda fileira é igual, só vai rodando.

**RO – Não exactamente, há variações ligeiras que lhe dá essa curva, embora o número de tijolos seja o mesmo o espaçamento entre eles varia. Daí mesmo que desse as plantas a um trabalhador ele teria de verificar as medidas a cada camada. Com o robot isso não acontece, não é preciso ajeitar o tijolo pois ele coloca-o no sítio com precisão.**

RHF – Os pontos de partida é sempre o mesmo em todas as peças?

**RO – Sim, tanto a nível do tijolo, é sempre o mesmo, como do desenho partem sempre destes dois quadrados.**

RHF – As peças que realmente me parecem mais interessantes, mais fortes são estas. (exemplo 1 e 4 dos pilares - ver página 66 e 68 respectivamente) embora estas (exemplos 2 e 3 dos pilares – ver página 67) sejam mais extravagantes, eu nas primeiras consigo ver uma regra e uma suavidade ao longo da superfície. Para mim as regras de confecção são muito importantes, qual é a regra nestas aqui?

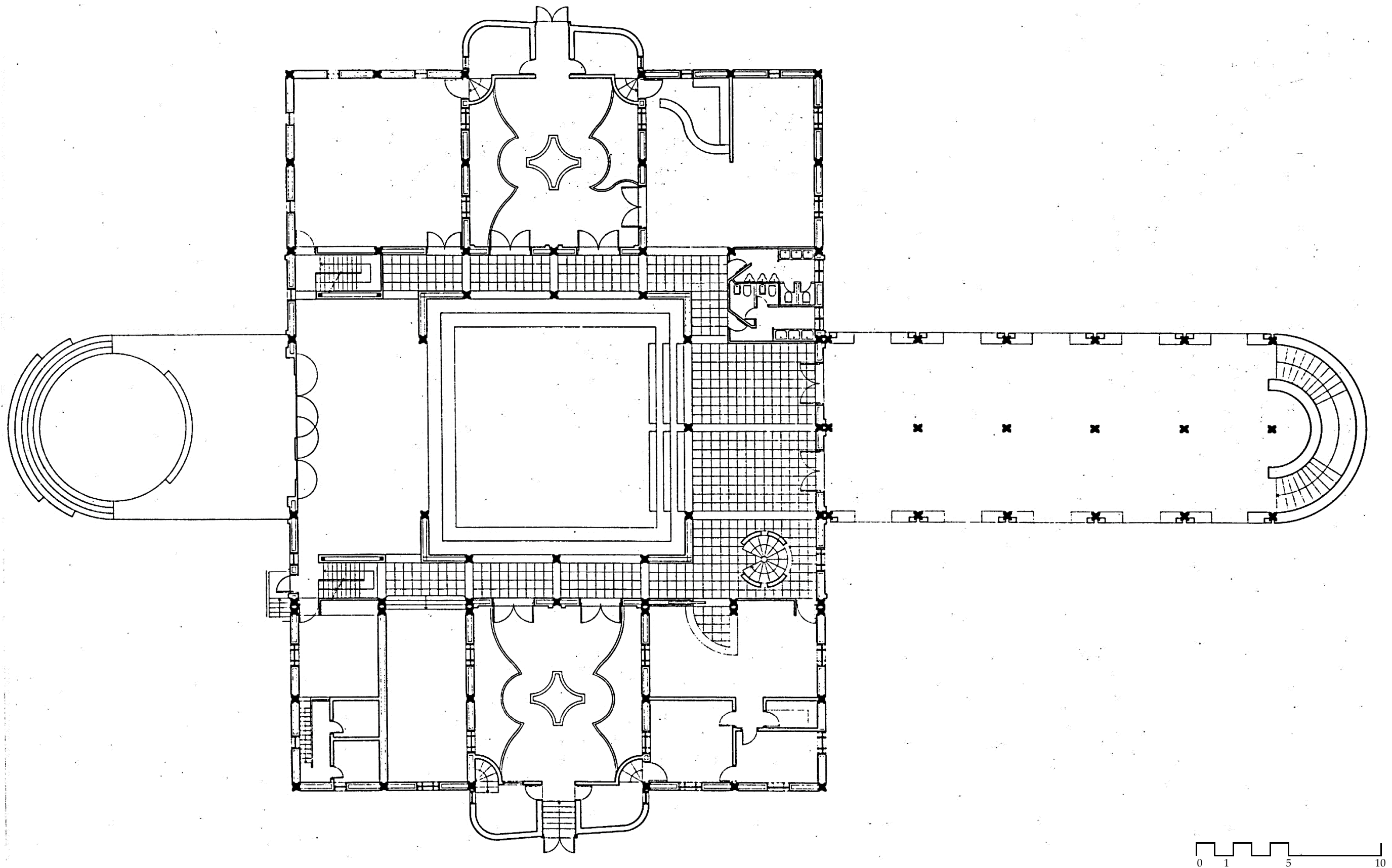
**RO – Neste trabalho isso não se põe. A única regras que se seguiu foi a regra do desenho, que premissas têm os desenhos dos exemplos, porque em termos de construção física, para o robot tanto faz assentar 100 tijolos numa superfície vertical ou numa superfície ondulada.**

RHF – Estou a perceber. Mas sim, acho que esta peça (exemplo 4 dos pilares – ver página 68) é a mais interessante, tem uma complexidade em que o que se vê dum lado não é bem o mesmo do que se vê do outro, ou se é não parece. Esta peça é muito bonita, e muito variável, tem bastante coisa a acontecer. Vão acontecendo aqui umas curvas que levam ao posicionamento destes tijolos, acho-a simples mas complexa. Um bom trabalho!

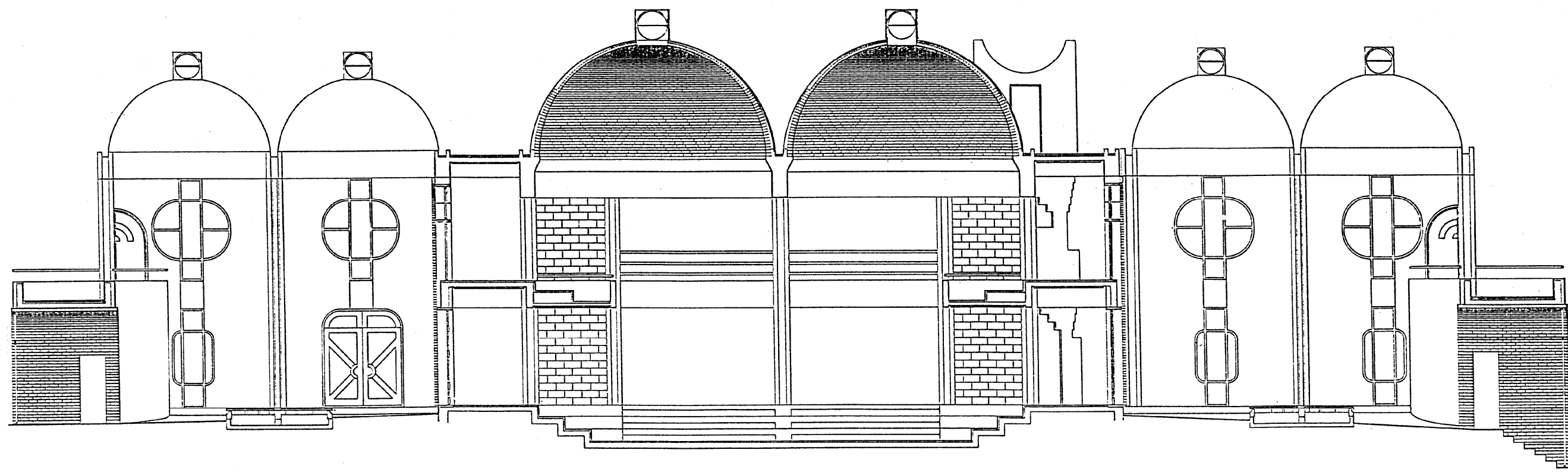
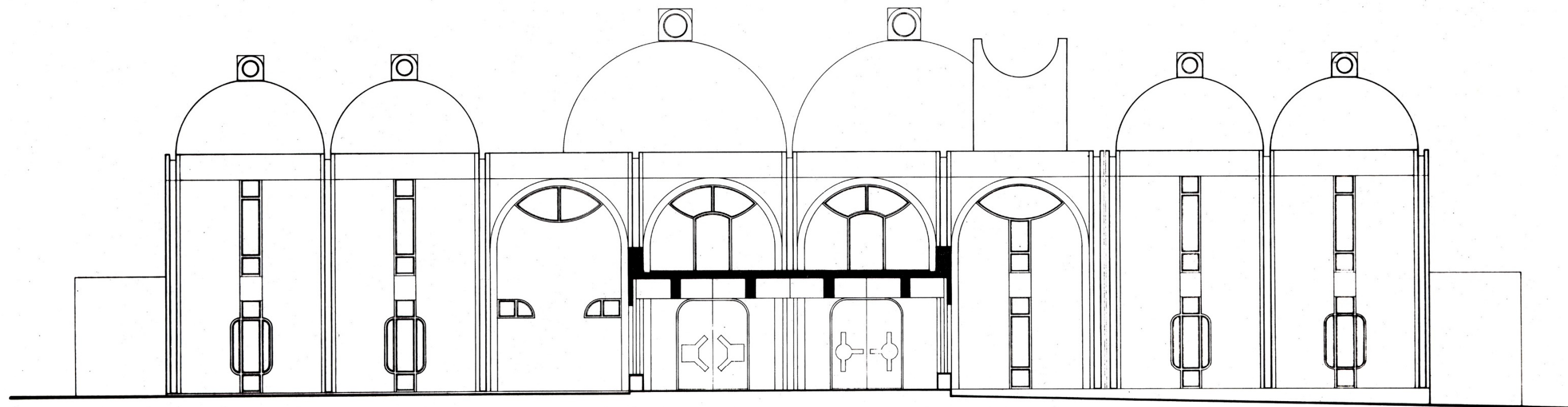


## C \_ Desenhos das obras de Raúl Hestnes Ferreira

### \_ Casa da Cultura de Beja | Planta

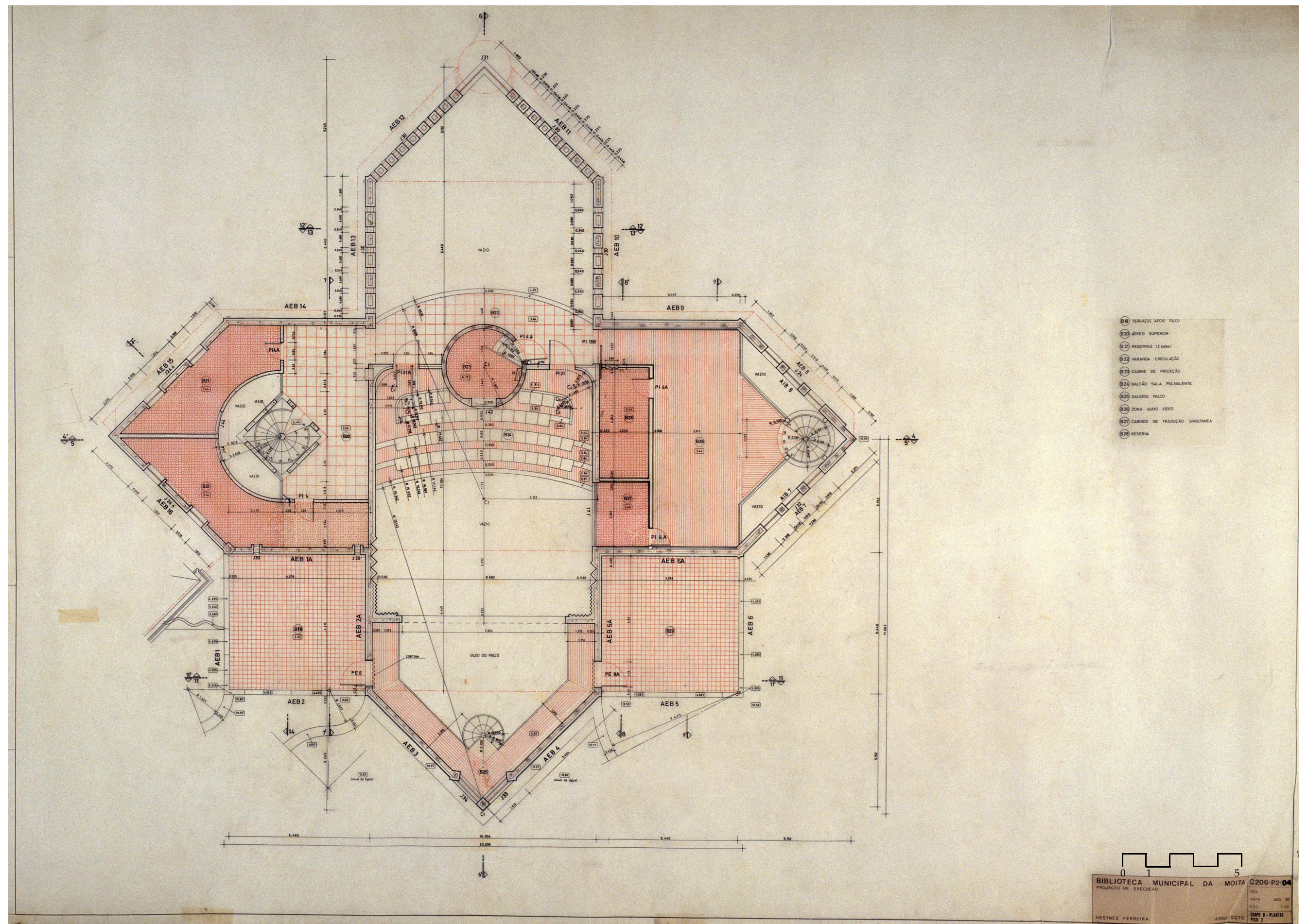


\_ Casa da Cultura de Beja | Secções

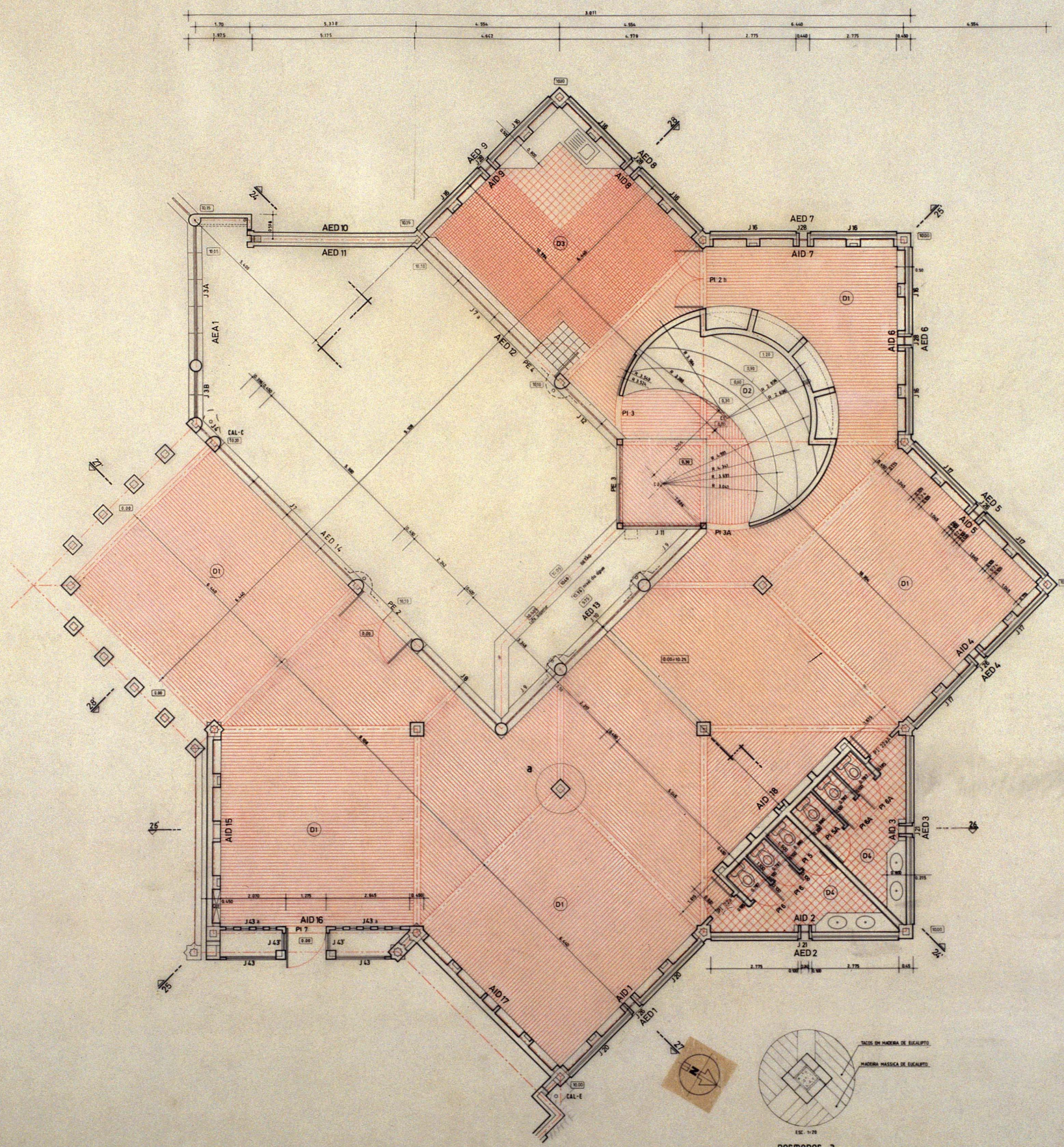




\_ Biblioteca Municipal da Moita | Plantas

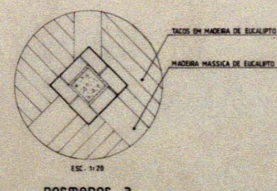






- (D1) ZONA DE LEITURA
- (D2) SALA DO CONTO
- (D3) OFICINA ATELIER
- (D4) INST. SANIT. INFANTES

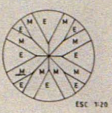
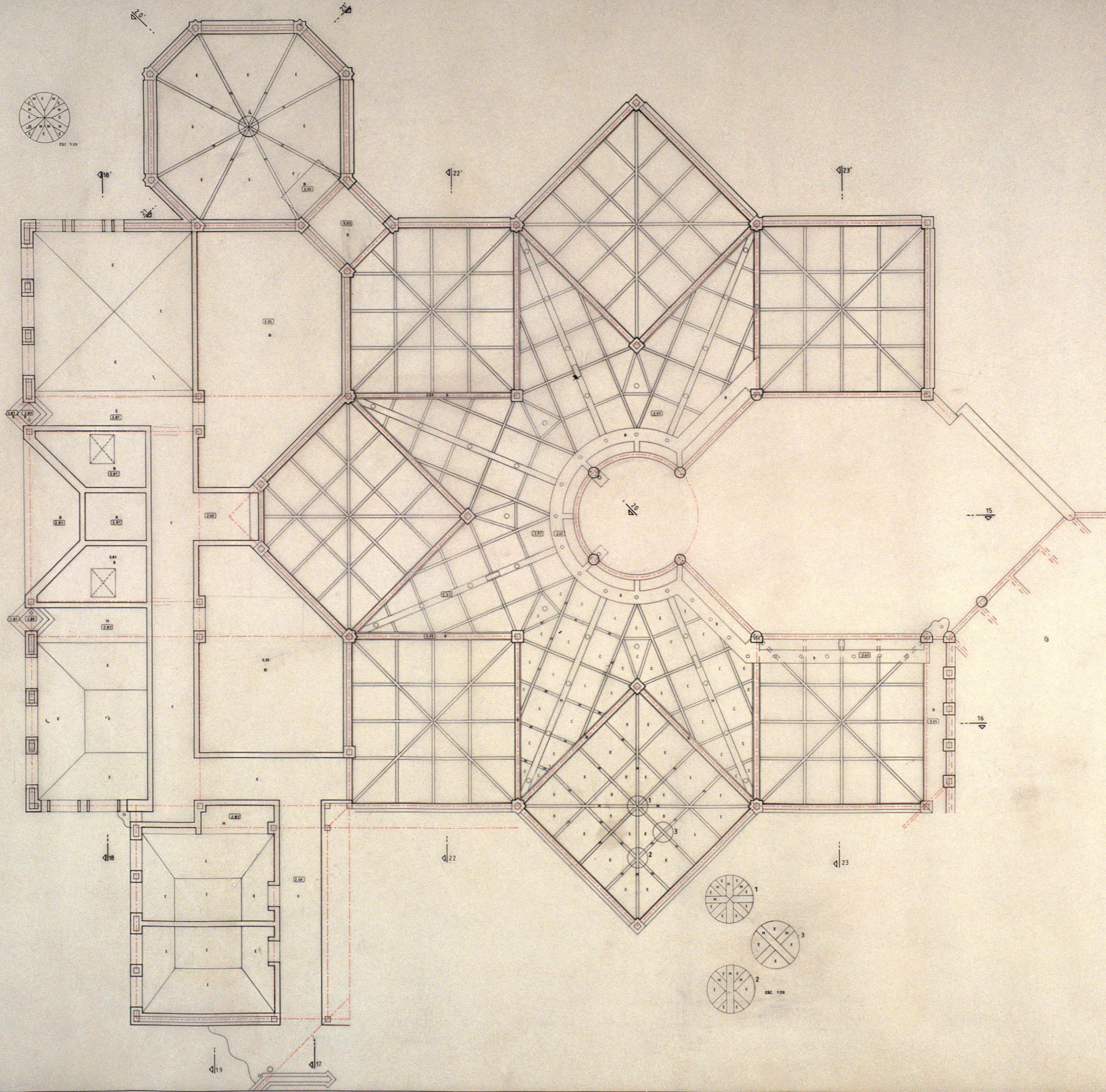
PORMENORES RELATIVOS AO LADO E TUBOS DE QUEDA, VER FOLHAS PL.38, PL.39 E P.93



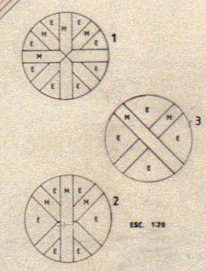
pormenor a







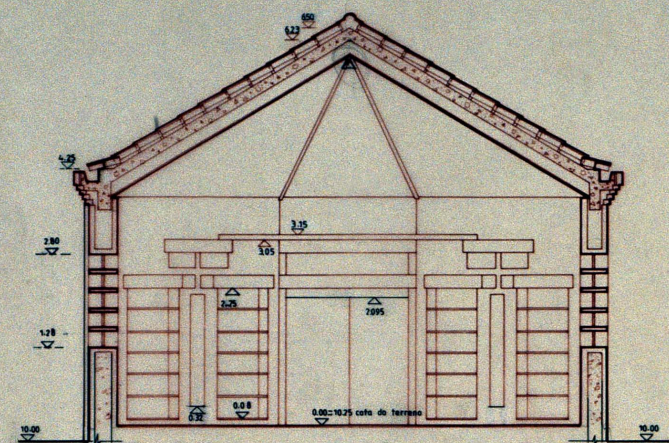
B. Balão  
 E. Estaque  
 M. Madeira maciça  
 C. Contraplacado



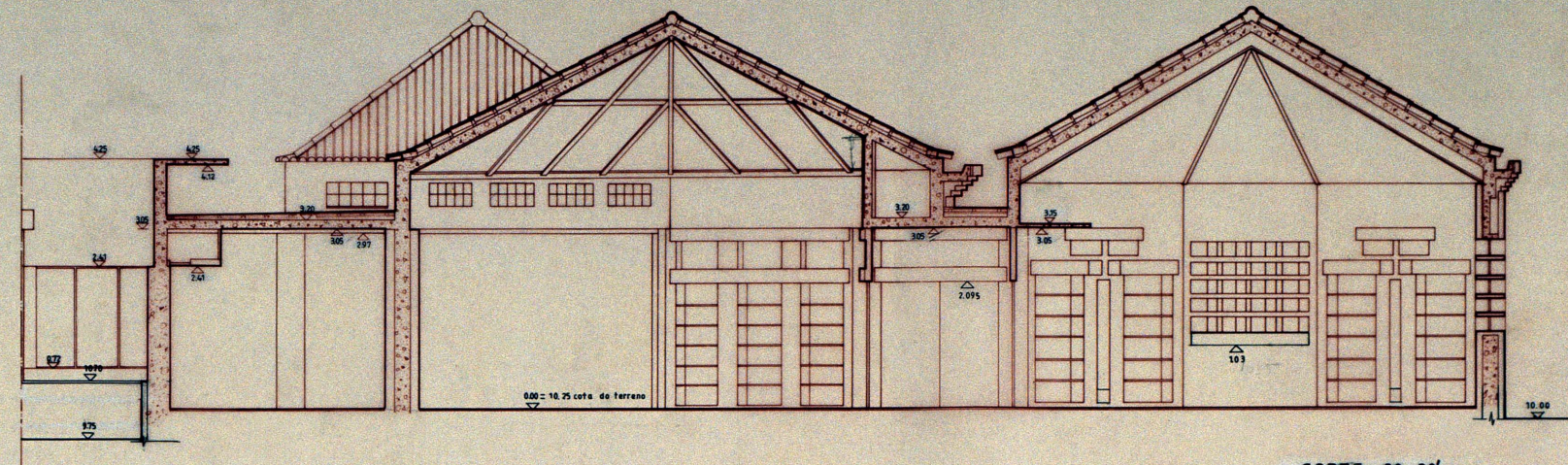
**BIBLIOTECA MUNICIPAL DA MOITA** C 206-2-08  
 PROJECTO DE EXECUÇÃO  
 DES. - ROBERTO M.  
 EXC. - F. S.  
 CORPO C - PLANTA  
 TECTOS  
 HESTNES FERREIRA ARQUITECTO



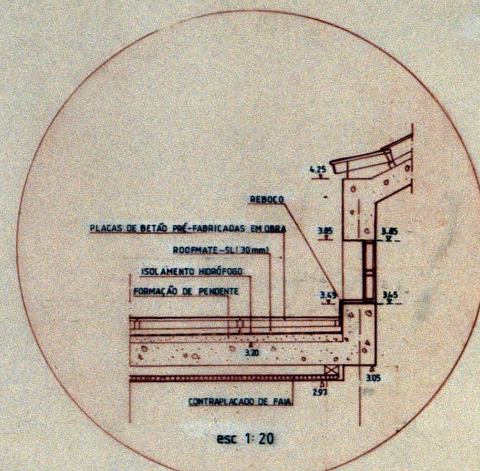
\_ Biblioteca Municipal da Moita | Secções



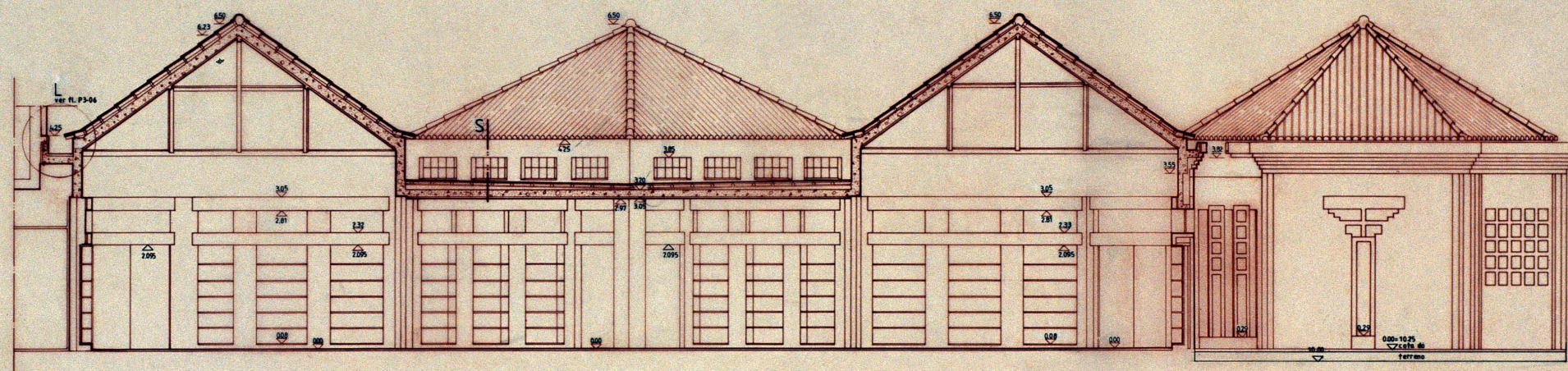
CORTE 21-21'



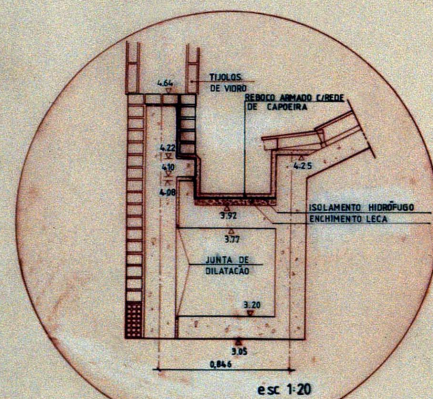
CORTE 20-20'



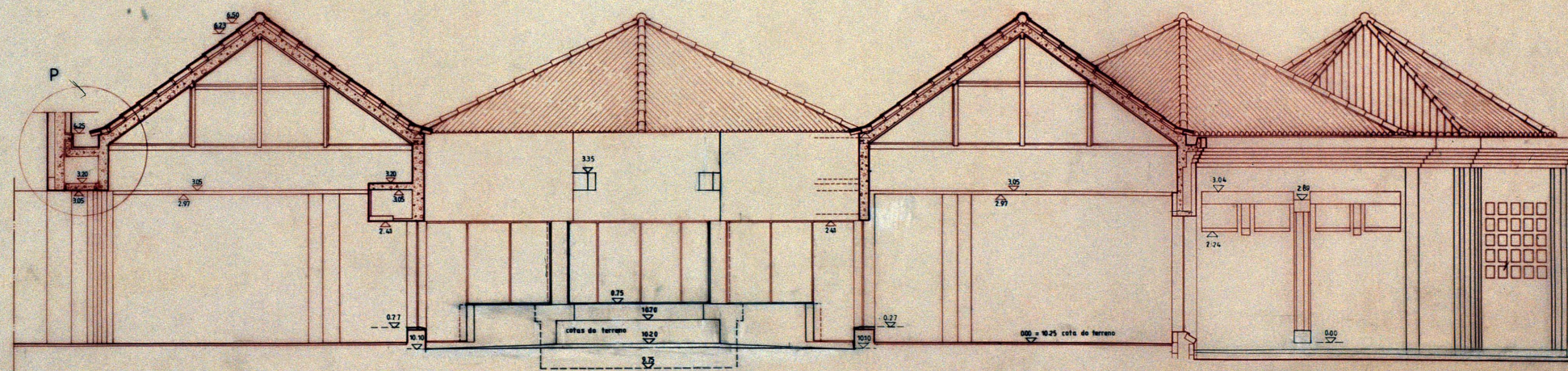
pormenor S



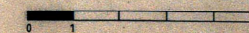
CORTE 22-22'



pormenor P

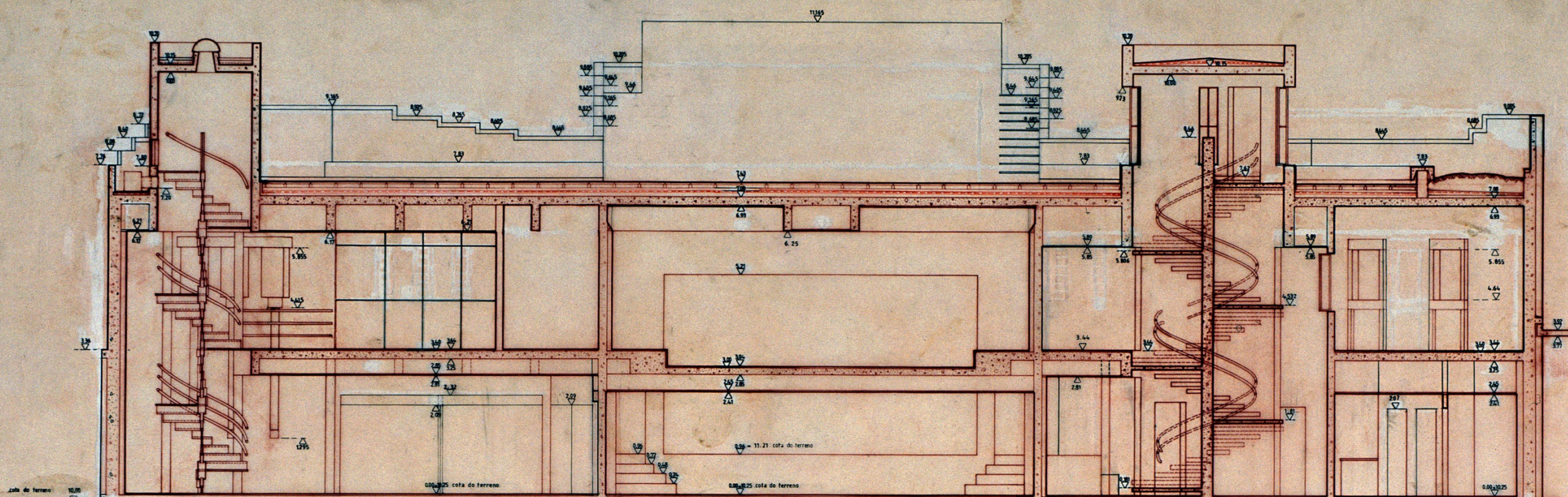


CORTE 23-23'

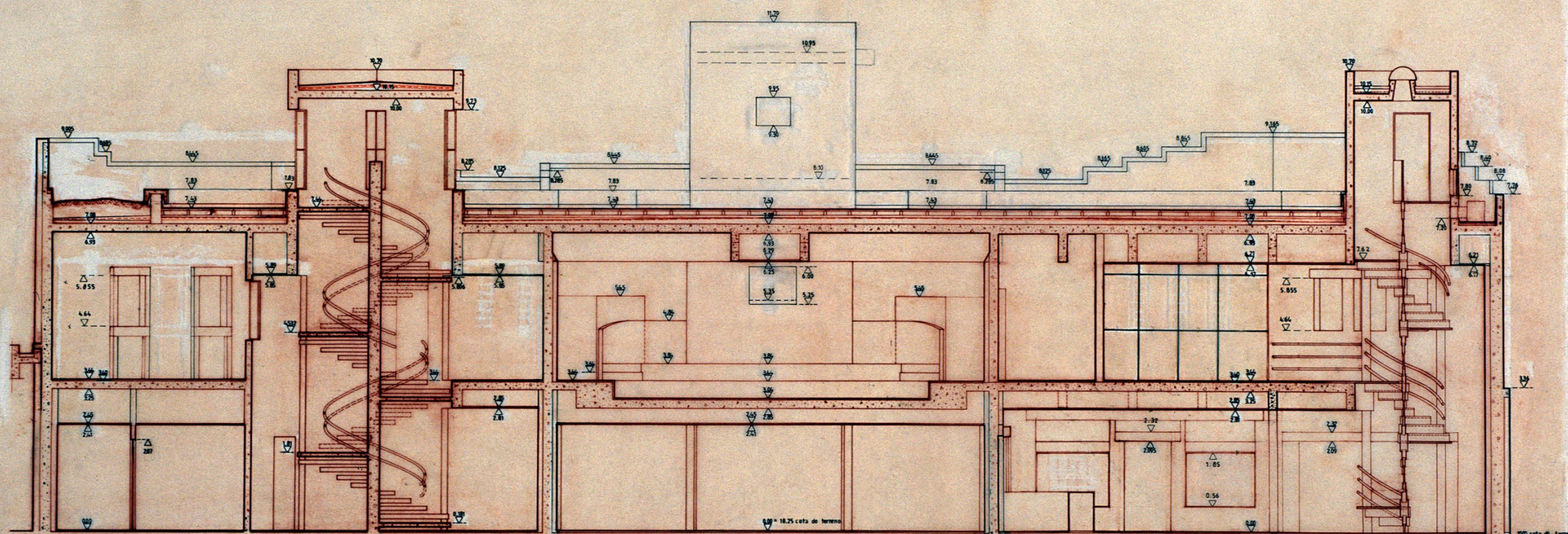


<b>BIBLIOTECA MUNICIPAL DA MOITA</b>		<b>C 206-P3-09</b>
PROJECTO DE EXECUÇÃO		DES.
		DATA AGOSTO 94
		ESC. 1:50
HESTNES FERREIRA		ARQUITECTO
		CORPO C. CORTES 20-20' 21-21' 22-22' 23-23'

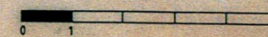




CORTE 4-4'



CORTE 5-5'



BIBLIOTECA MUNICIPAL DA MOITA C 206-P3-02  
PROJECTO DE EXECUÇÃO

DES.  
DATA AGOSTO 90  
ESC. 1:50  
CORPO B CORTES  
4-4' 5-5'

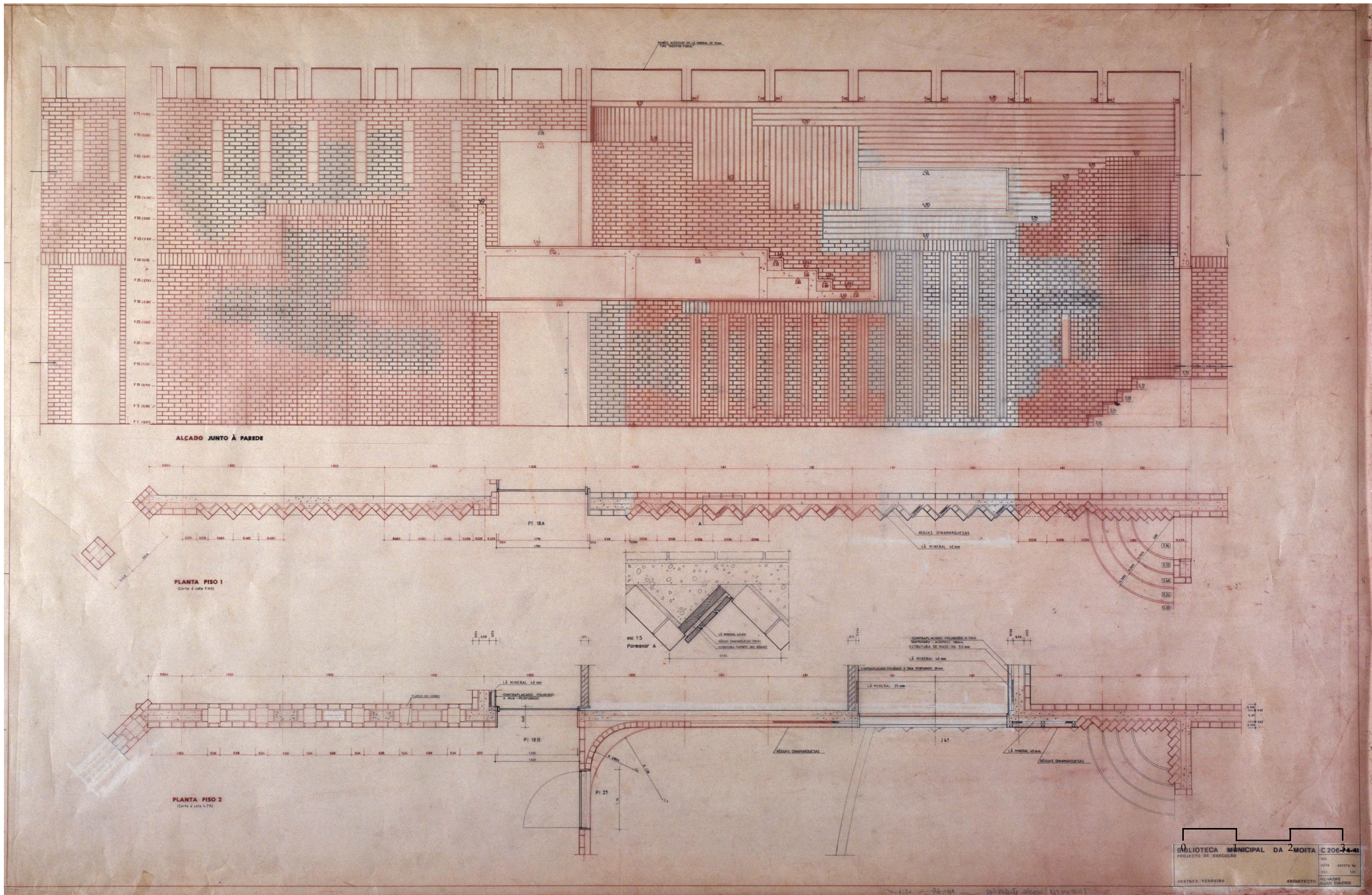
HESTNES FERREIRA

ARQUITECTO

1/100

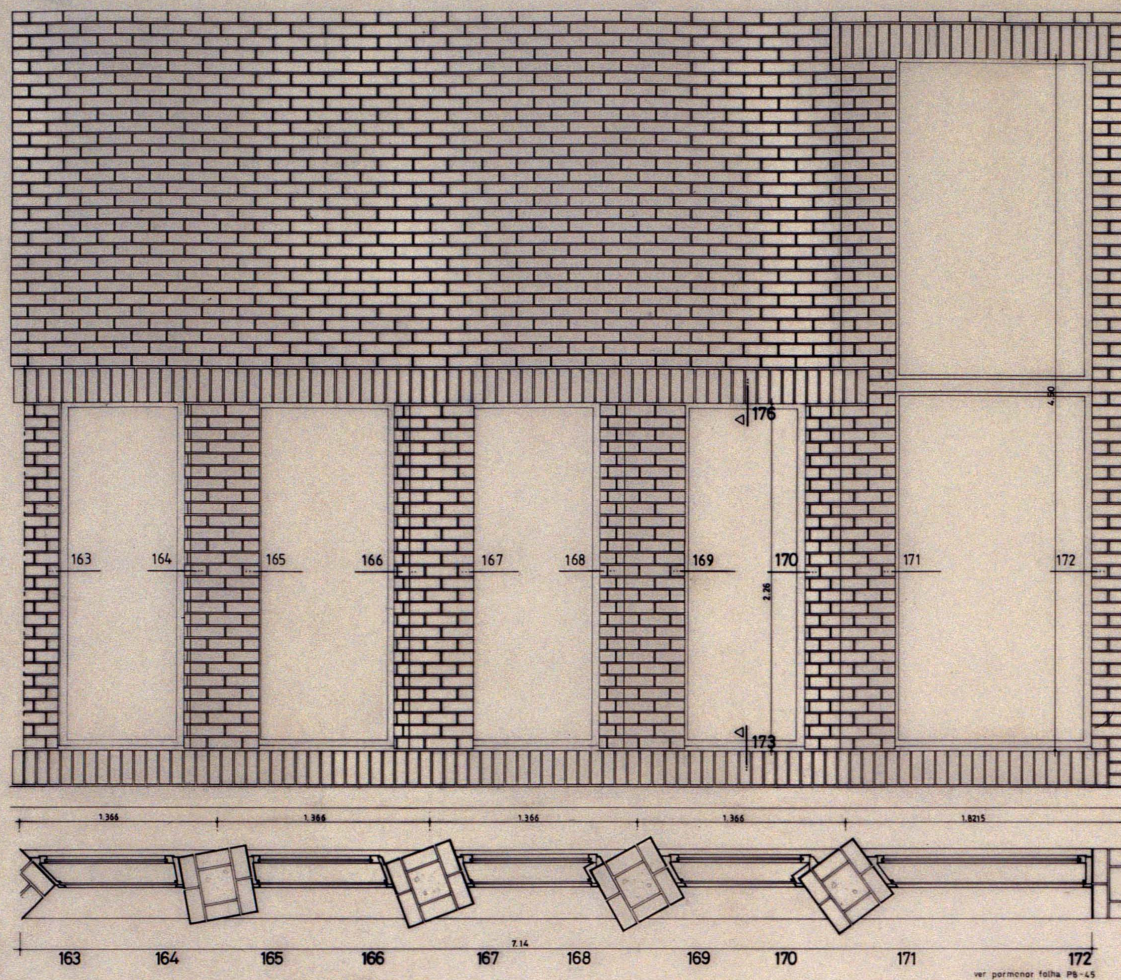


## **Biblioteca Municipal da Moita | Pormenores**

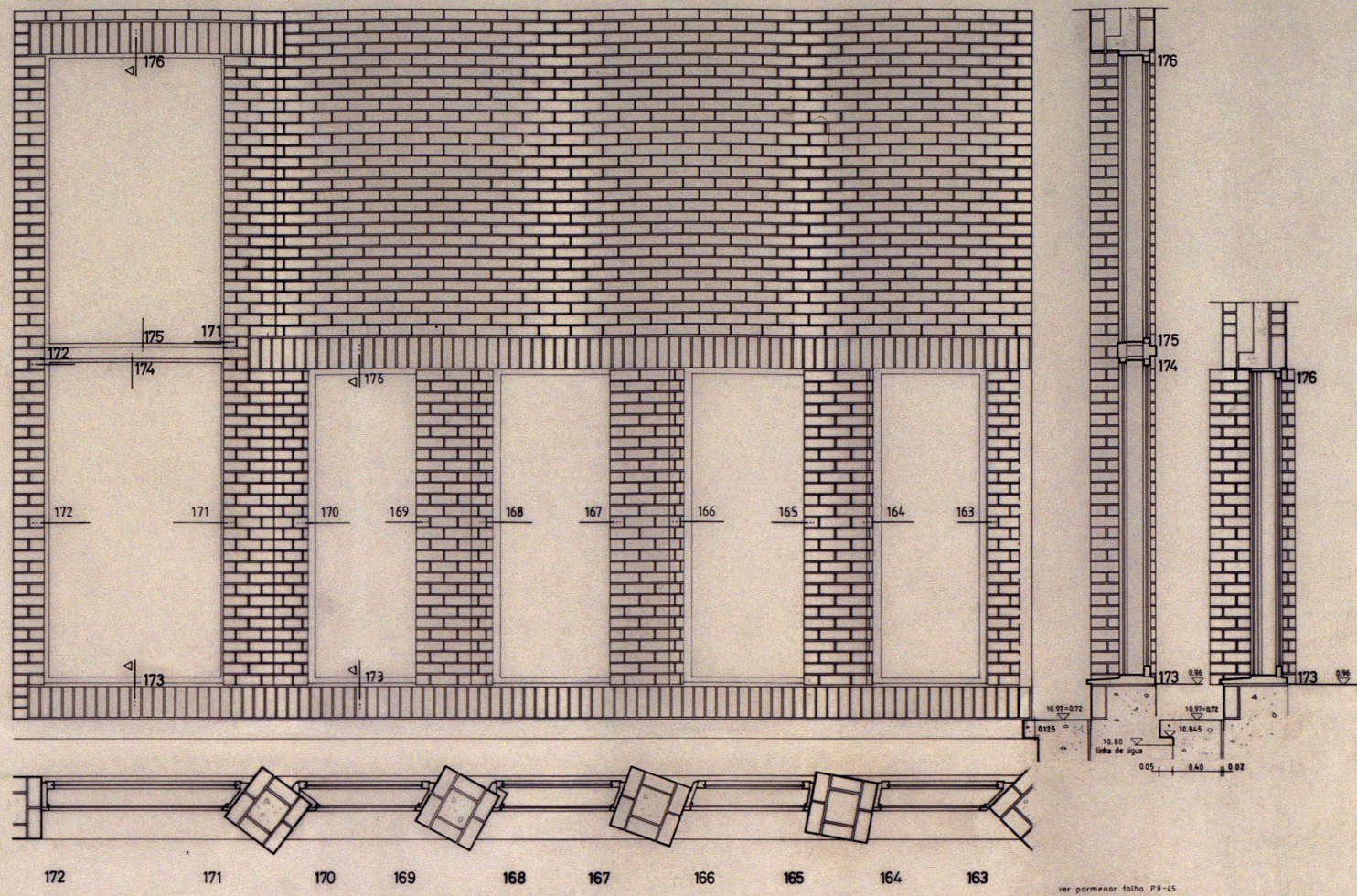




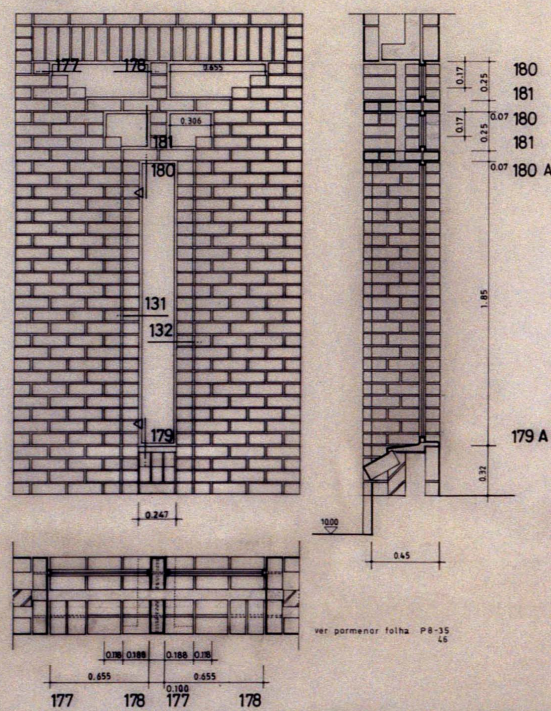
J33



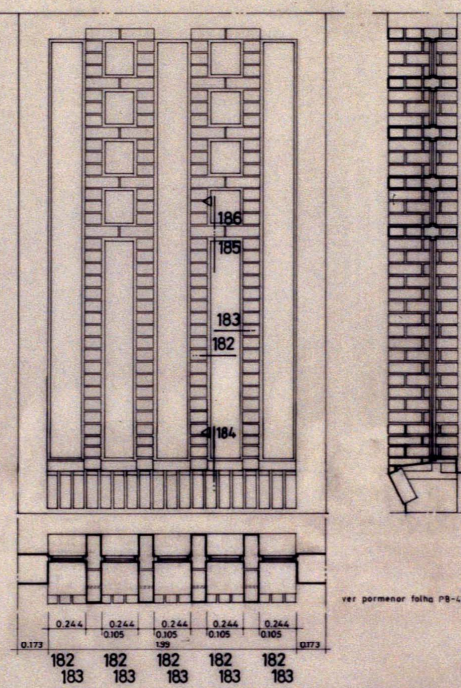
J34



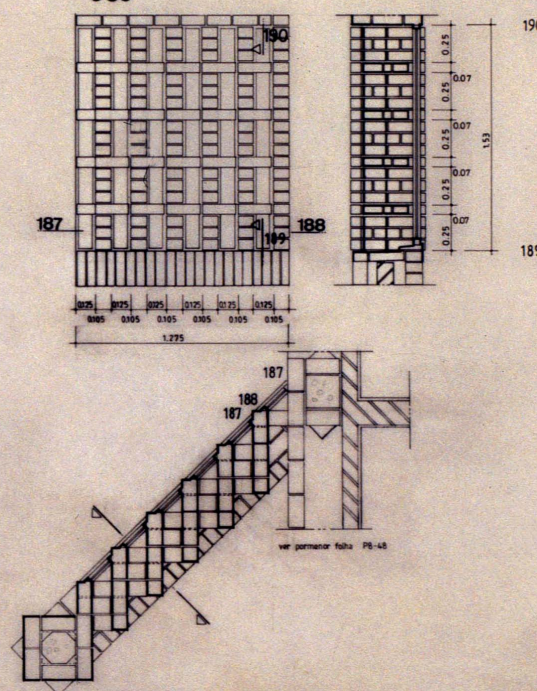
J35



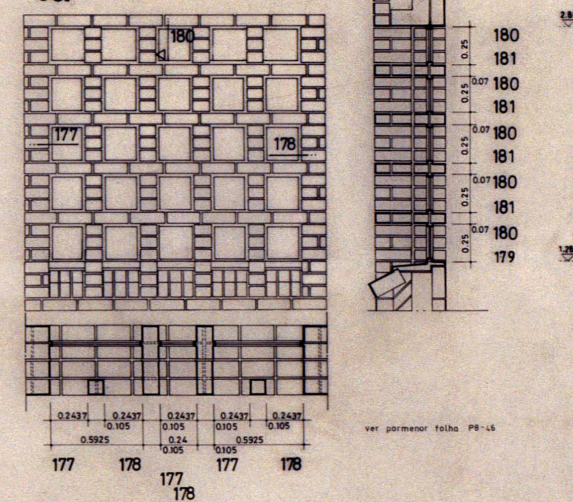
J36



J38



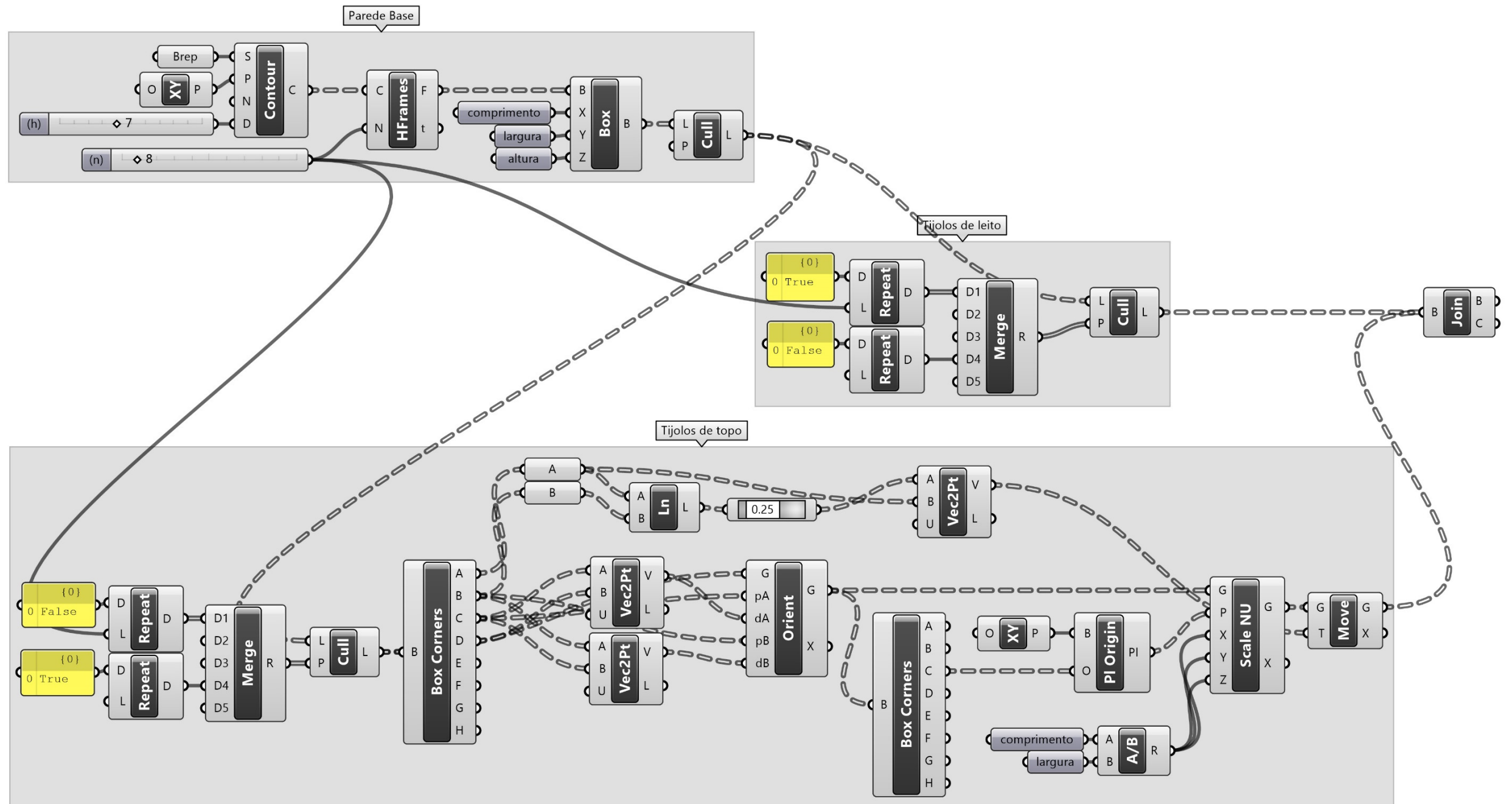
J37



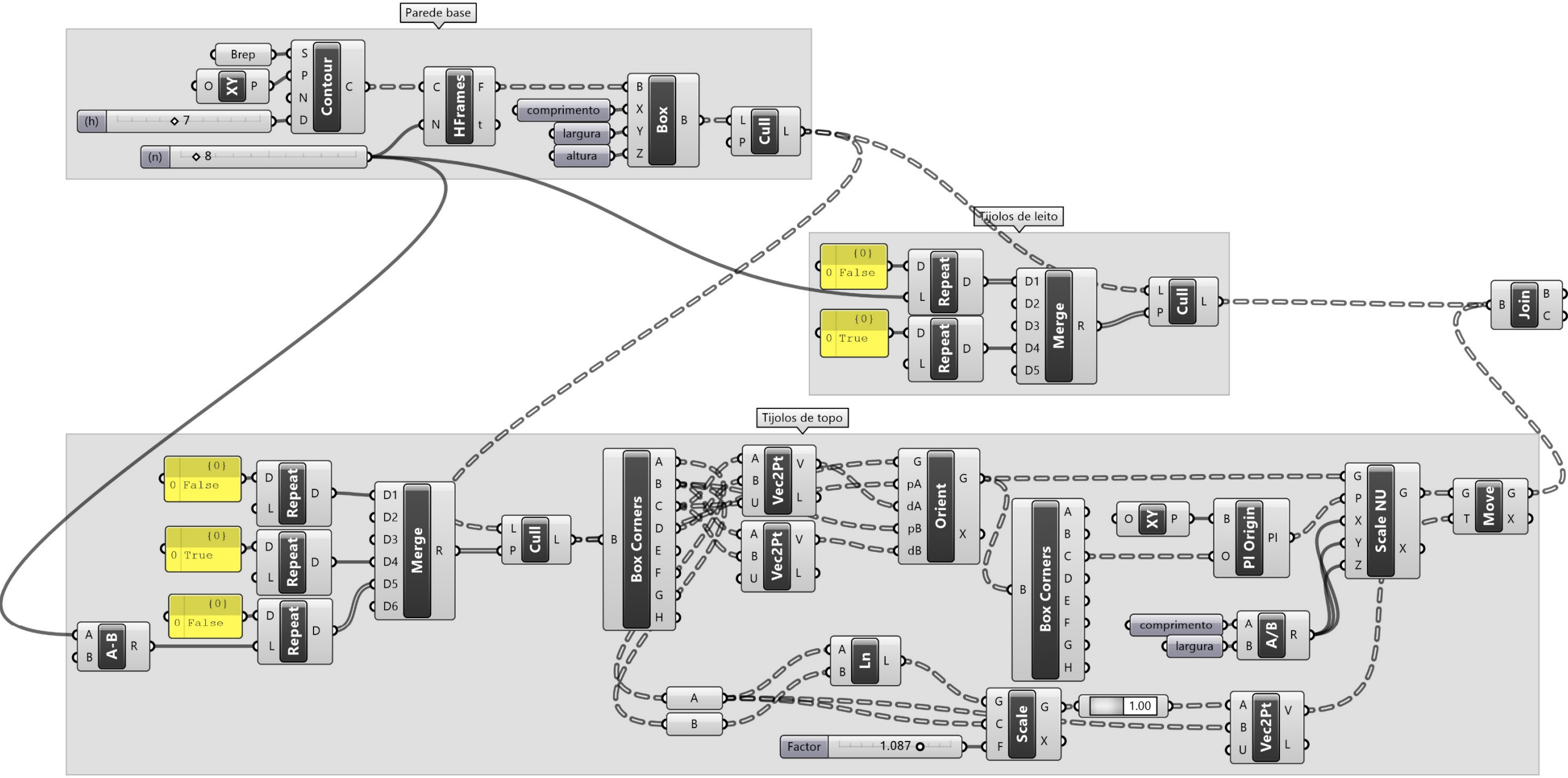


## D \_ Definições de Grasshopper

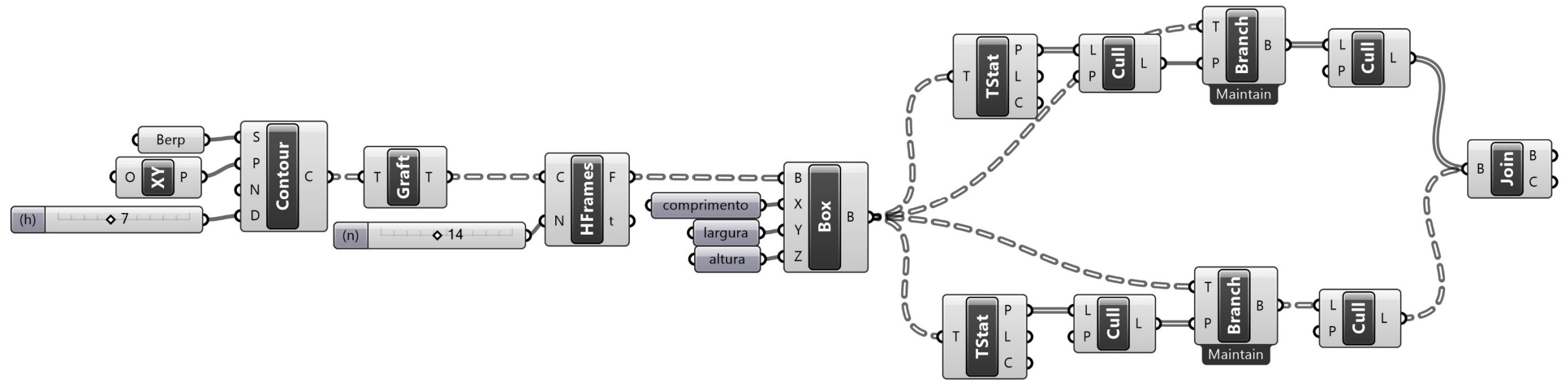
### \_ Definição para cunhais (superfície 1)



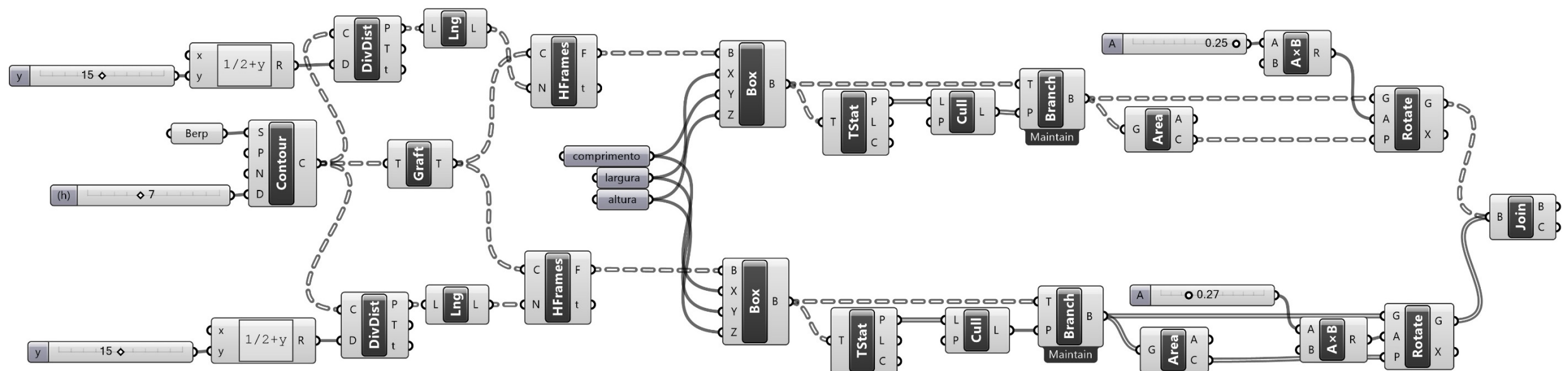
\_ Definição para cunhais (superfície 2)



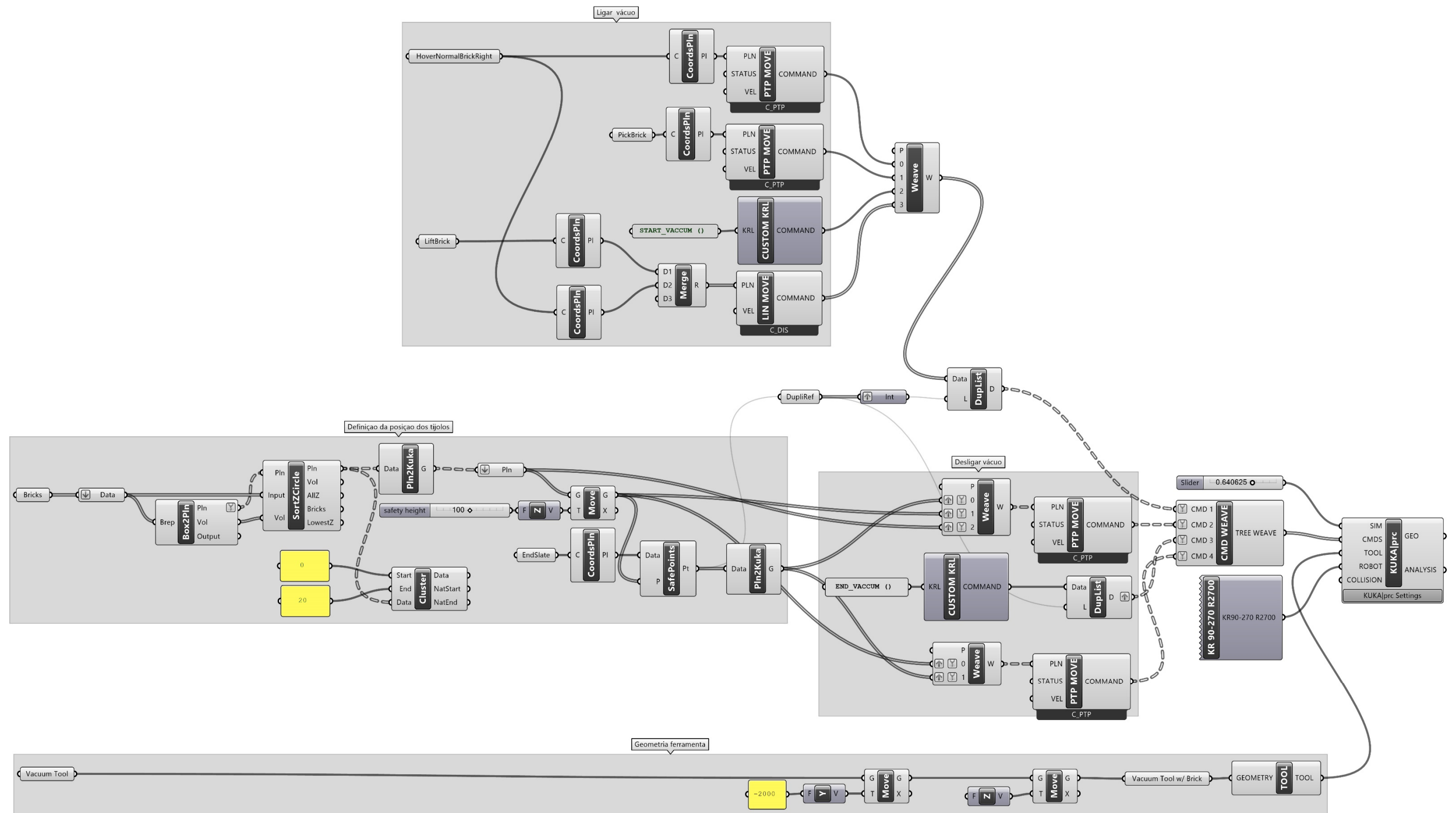
### \_ Definição para pilares



### \_ Definição para abóbadas



### \_ Definição para programação do *robot*







## E \_ Especificações das impressões 3D



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h01m
Dimensões (mm)	14,5×14,5×66
Peso (g)	6,27



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h07m
Dimensões (mm)	17,2×17,9×66
Peso (g)	7,61



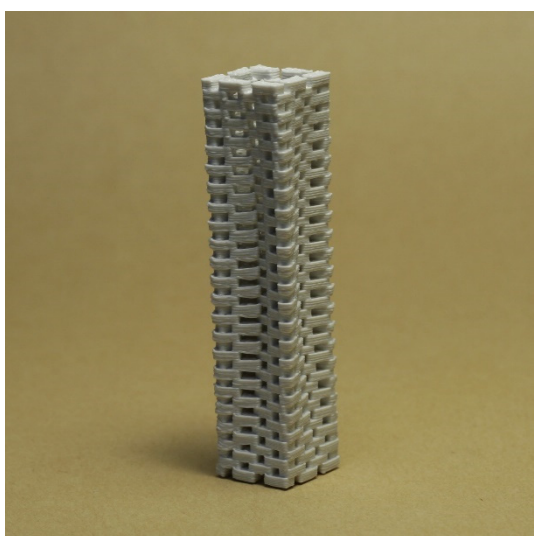
Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h11m
Dimensões (mm)	23,8×23,8×66
Peso (g)	8,84



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h11m
Dimensões (mm)	22,3×19,6×66
Peso (g)	8,55



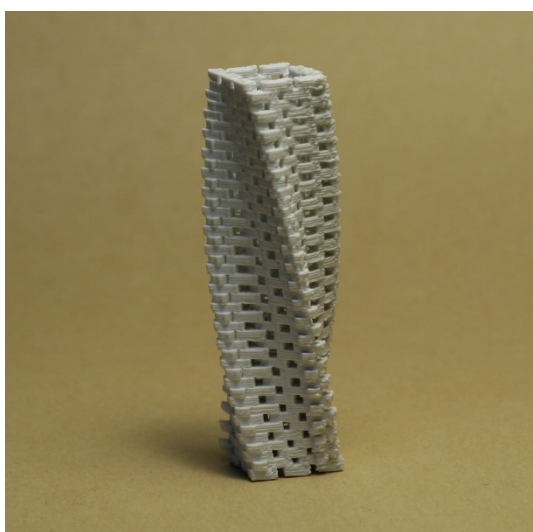
Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h14m
Dimensões (mm)	25,5×25,5×66
Peso (g)	9,69



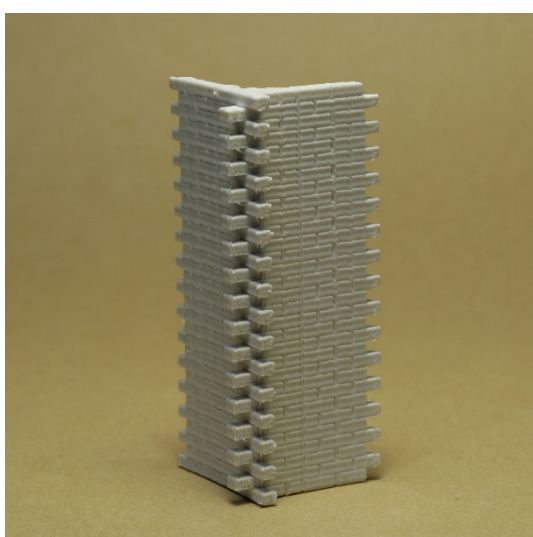
Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h31m
Dimensões (mm)	17,6×17,6×66
Peso (g)	10,90



<b>Material</b>	ABS
<b>Impressora</b>	Makerbot Replicator 2X
<b>Tempo de impressão</b>	1h43m
<b>Dimensões (mm)</b>	24×24×66
<b>Peso (g)</b>	12,41

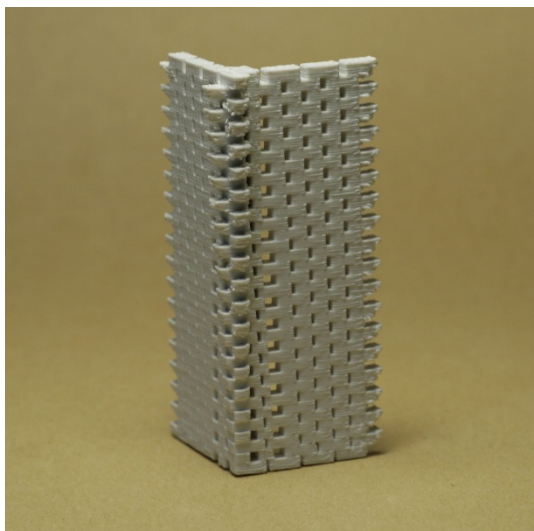


<b>Material</b>	ABS
<b>Impressora</b>	Makerbot Replicator 2X
<b>Tempo de impressão</b>	1h13m
<b>Dimensões (mm)</b>	23,3×23,2×66
<b>Peso (g)</b>	9,45

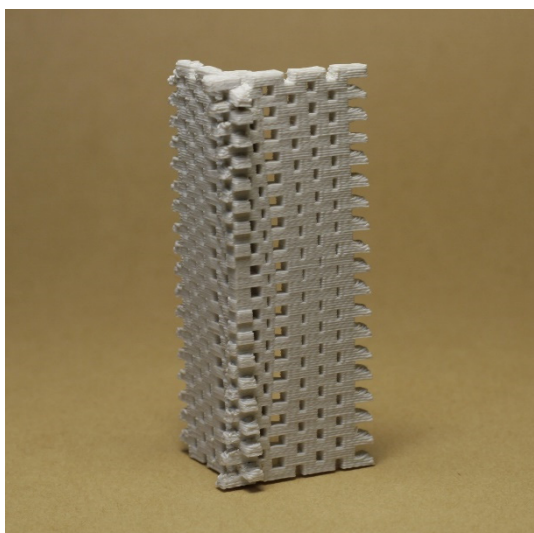


<b>Material</b>	ABS
<b>Impressora</b>	Makerbot Replicator 2X
<b>Tempo de impressão</b>	1h37m
<b>Dimensões (mm)</b>	28,5×28,5×66
<b>Peso (g)</b>	12,37

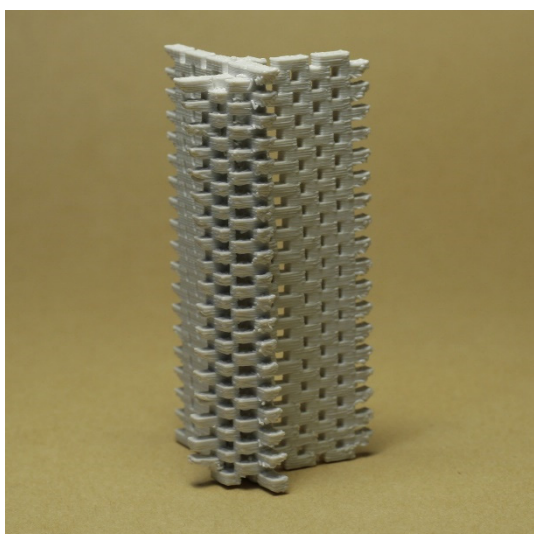




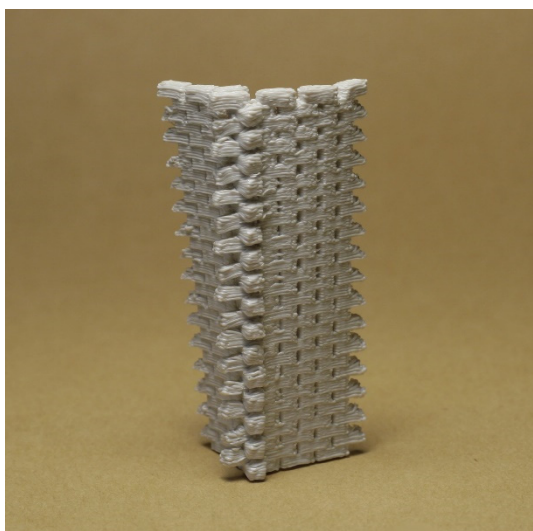
Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h15m
Dimensões (mm)	30,8×30,8×66
Peso (g)	11,01



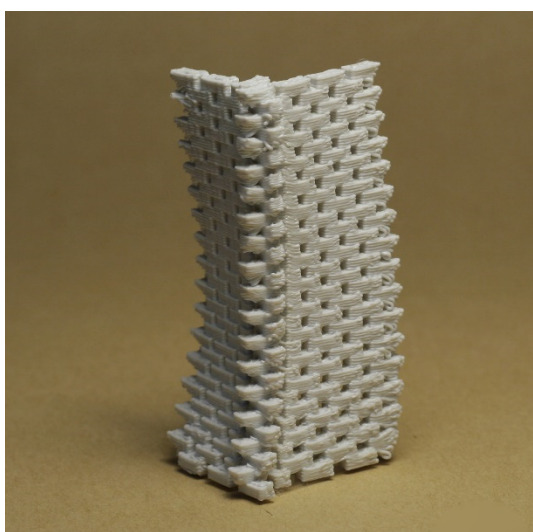
Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h10m
Dimensões (mm)	28,1×27,8×66
Peso (g)	9,62



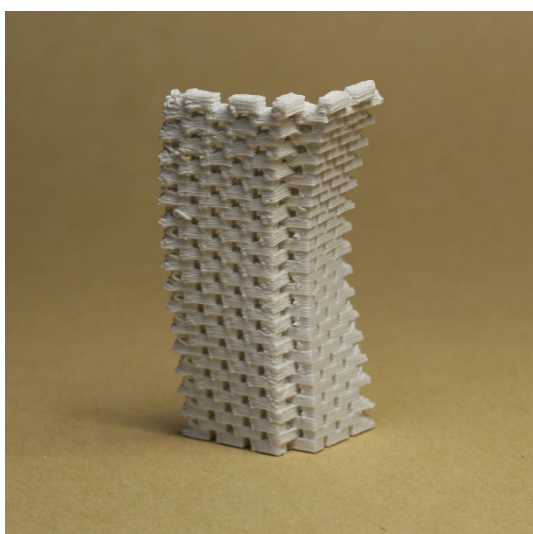
Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h22m
Dimensões (mm)	34,3×34×66
Peso (g)	12,27



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	56m
Dimensões (mm)	21,6×28,2×54
Peso (g)	6,56



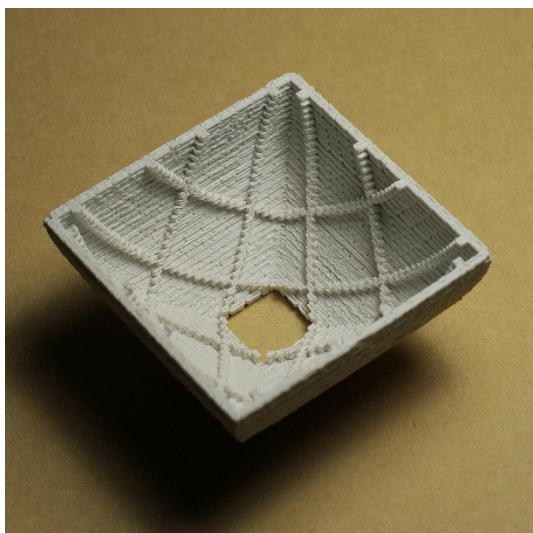
Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	57m
Dimensões (mm)	28,5×31,5×54
Peso (g)	7,06



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	54m
Dimensões (mm)	30,9×24,9×54
Peso (g)	5,91



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	3h10m
Dimensões (mm)	66×66×31,5
Peso (g)	14,13



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h28m
Dimensões (mm)	50×50×22,8
Peso (g)	9,17



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	2h04m
Dimensões (mm)	50×50×27
Peso (g)	12,32





Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h58m
Dimensões (mm)	50×50×27
Peso (g)	13,71



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h56m
Dimensões (mm)	50×50×27,6
Peso (g)	11,72

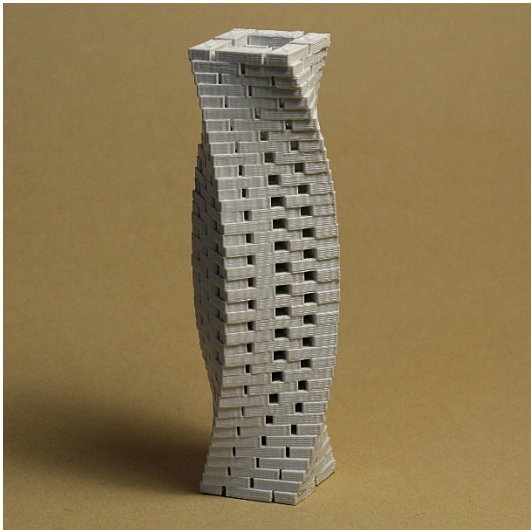


Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h59m
Dimensões (mm)	50×50×27,6
Peso (g)	13,91





Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	1h51m
Dimensões (mm)	50×50×27
Peso (g)	12,96



Material	ABS
Impressora	Makerbot Replicator 2X
Tempo de impressão	2h56m
Dimensões (mm)	37,7×36,4×105
Peso (g)	32,85

